الكلية الفنية العسكرية العراقية

منظومات القدرة الكهربائية

Electrical Power Systems

الجزء الثاني

ترجمة

الدكتور المهندس محمد توفيق لازم الزهيري

الدكتور المهندس فائق جواد محمد العزاوي



الكلية الفنية العسكرية

منظومات القدرة الكهربائية

الجزء الثاني

الدكتور المهندس محمد توفيق لازم الزهيري

ترجمة

الدكتور المهندس فائق جواد محمد العزاوي

الكلية الفنية العسكرية

منظومات القدرة الكهربائية

ELECTRICAL POWER SYSTEMS

تأليف

BY:

اي . اي . غايلي

A. E. Guile

دبليو . باترسون

W. Paterson

ترجمة

الدكتور المهندس
محمد توفيق لازم الزهيري

الدكتور المهندس
فائق جواد محمد العزاوي

الجزء الثاني

شكـــر

تشكر الكلية الفنية العسكرية استاذ الهندسة الكهربائية الدكتور محمد زكي محمد خضر / رئيس مهندسي المنشأة العامة لصناعات السمنت في نينوى لتفضله بتقويـم الكتاب علميا .

والدكتور حسام سعيد النعيمي – الاستاذ المساعد في كلية الاداب / قسم اللغة العربية / جامعة بغداد لتفضله بتقويم الكتاب لغوياً .

المحتويات

المقدمة

ان هذا الكتاب هو الجزء الثاني للكتاب في جزأين كتب للطلبة الذين يدرسون منظومات القدرة الكهربائية في الجامعات . والمعاهد والكليات التكنولوجية والقائمين بالتحضير لنيل شهادات الشرف الاعتيادية . وكذلك للذين يؤدون امتحان القسم الثاني لمجلس معاهد المهندسين . ولطلبة الـ H.N.D. والـ H.N.C. وقد تم التوسع في هذا الكتاب ليشمل المقرر الدراسي للسنة المنتهية لنيل شهادة الشرف . وتتغير المقررات الدراسية الموضوعة فيه الى حد كبير بحيث ان بعضاً من طلبة الماجستير قد يجدون مايعينهم في بعض النصوص من هذا الكتاب . في حين ان الطلبة الذين يدرسون المقررات الدراسية التي مستواها أقل من مستوى شهادة الشرف يجب ان تكون لديهم المقدرة على الاستفادة من بعض المواضيع ضمن اختيار ملائم لها . ولما كان من المستحيل تغطية عموم مضمار هندسة القدرة الكهربائية فان المؤلفين قد انجزا ما عدّاه اختياراً مناسباً للمواد الأساسية . ومن المؤمل ان الطلبة سوف يقومون بقراءة مستفيضة لهذين الكتابين بأنفسهم . وبذلك يكون وقت المحاضر والطلبة لمناقشة حلول المسائل والتوسع في نطاق المحاضرات لملائمـــة رغبتهـــم .

وفي هذا الجزء من الكتاب من الممكن القطع بحقيقة كون مشاكل منظومة القدرة تشمل التفاعل مابين اجزاء كثيرة من الاجهزة والمعدات . وبصورة أشمل مما في الجزء الاول بحيث يكون المطلوب هو اسلوب التعامل مع المنظومات للموضوع بأكمله . لقد استخدمت طرق المصفوفات بصورة اوسع مما في الجزء الاول . وقد تم التطرق باسهاب الى استخدام الحاسبات الالكترونية والتمثيل المنظم لمنظومة قدرة بصيغة تلائم الطرق الحديثة للحاسبات . وفي الفصل الأخير اعطيت نظرة عامة لاوجه بعض المنظومات المهمة والتي هي الان في مرحلة التطوير . وكذلك اعطيت مراجع كثيرة للتمكن من توسيـع المعلومات حول هذه التطويرات وللوقوف على الفرص والتحديات العلمية العظيمين المتاحة للمهندسين الذين يختارون العمل في هذا المضمار .

ويرغب المؤلفان في تقديم شكرهما الى الاعضاء العاملين في مجلس توليد الكهرباء المركزي للمنطقة الشمالية الشرقية في بريطانيا وهـــم : أف . أج . بريخ لمساعدته القيمة في اعداد الفصل التاسع والسادة سي . سي باكسنديل ودبليو . فيوني وكي . جي . وارنر

لمساعدتهم القيمة في اعداد الفصل الاول والثالث والملحق الثاني على التوالي . كذلك يتقدم المؤلفان بشكرهما الى السيد آن . أس . اليس المنسوب الى شركة آي . ريرولي A. Reyro، المحدودة لمراجعته الفصل الثاني . ومرة اخرى فان المؤلفين يتقدمان بشكرهما الى المعاهد التي اخذت منها أوراق الاسئلة الامتحانية كما تم ذكره في الجزء الاول من هـــذا الكتـــاب .

الفصل الاول

الحماية : PROTECTION

1.1 مقدمة :

ان موضوع الحماية تم التطرق اليه في الفصل التاسع في الجزء الاول من هذا الكتاب . حيث انتهى بمناقشة حماية المغذيات (نقل / توزيع) باستخدام الاسلاك المرشدة بطول مسار يكون بحدود 30 كم . ومنظومات الحماية ذات الفولتية المتوازنة (فولتية – معاكسة) . ويستمر هذا الفصل في مناقشة موضوع حماية الخطوط العلوية المعلقة overhead lines التي يكون طولها اكثر من الحد المذكور في اعلاه . ان الفكرة الاساسية تتضمن الغاء السلك المرشد . وسيتم مناقشة منظومتين كهذه :

(أ) الحماية المسافية Distance protection.

(ب) الحماية الحاملة Carrier protection.

ان الحماية الحاملة لاتلغي حقيقة السلك المرشد ولكنها تستخدم خطوط القدرة نفسها اسلاكا مرشدة .

أحد ابسط منظومات حماية مغذيات القدرة يحقق التمييز بوساطة التدرج الزمني (انظر الجزء الاول . الفقرة 9.4) . ولكن له عيب يمكن في طول ازمنة ازالة العطل للاعطال التي تكون قريبة جدا من المصدر حيث تكون مستويات العطل اعلى مايمكن .

والعطب الذي يمكن ان يحدث خلال أزمنة ازالة العطل الطويلة هذه لايمكن تقبله لخطوط الفولتية العالية المهمة وعليه فان مثل منظومة الحماية هذه لاتستخدم لهذه الخطوط ولاحتى بوصفها حماية ساندة . وتعطي الحماية الوحدية ذات الفولتية

المتوازنة (انظر الجزء الاول ، الفقرة 9.5) أزمنة افلات لخطية (حوالـي 0.1 ثانية) للاعطال الداخلية (ضمن المنطقة المعرفة بمواقع مجموعتين من محولات التيار C.T.s) ، والاستقرارية (بدون – افلات) للاعطال الخارجية (النافذة) ، ولـكن المنظومـة يلزمها سلك مرشد يمكن للتيار ان يمر حوله . وللخطوط الاطول ، يكون هذا المرشـد عادة قابلواً هاتفياً مستأجراً من هيئة البريد والهاتف وهو غالـي الثمن (حيث يتـم حساب كلفته على اساس الميل الواحد لـكل سنة) وقد يتعرض الى التداخل . اما الحدود العملية لطوله فتكون حوالـي 30 كم وهذا هو طول مسار المرشد الذي غالباً ما يكون اطول من مسار الخط نفسه .

وللحصول على تفاصيل عملية حول منظومات الحماية التي ستتم مناقشتها ، على الطالب ان يطلع على كتاب « حماية منظومة القدرة » (بثلاثة اجزاء) للهيئة العامـة للـكهرباء وكذلك الـكتب التي تصدر عن المصنعين لهذه المنظومات .

1.2 الحماية المسافية (الممانعية) : Distance (Impedance) protection

يبين الشكل 1.1 (أ) خطاً شعاعياً بسيطاً . في البداية ، افرض للسهولة ان التوليد يكون في قضيب التوزيع A فقط وليس هناك تغذية لعطل ما في قضبان التوزيع الاخرى . ويبين الشكل منظومة مسافية منصوبة في الخط AB عند النهاية A (النهاية المحلية) ، والغرض منها حماية الخط AB (المنطقة المحمية) ضد تغذيات العطل عند A : اما النهاية B فهـي النهاية البعيدة . افرض عطل دائرة قصيرة ثلاثـي الطور على الخط AB ، ولتكن Z_f ممانعة الخط من نقطة المرحل عند A الى نقطة العطل (الممانعة الابتدائية) . في هذه الحالة تكون الفولتية على ابتدائـي محول الفولتية (V.T.) هي

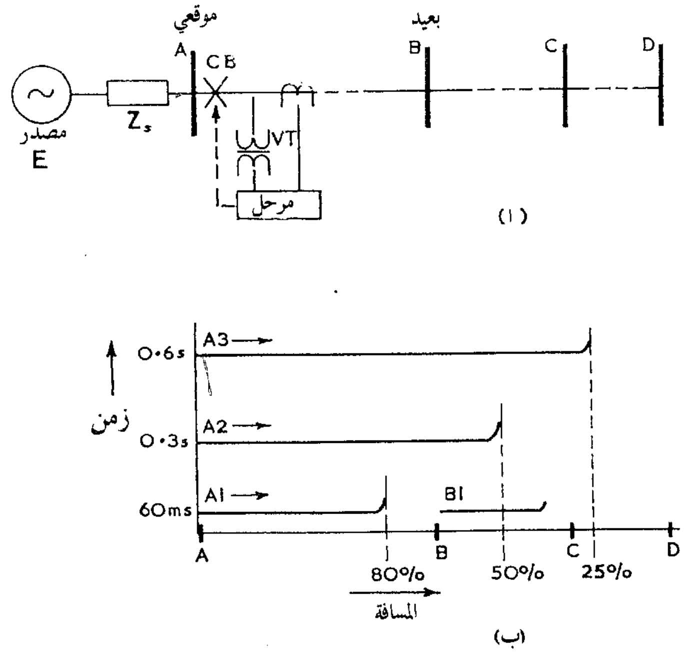
$$V = EZ_f/(Z_s+Z_f) \qquad [1.1]$$

ويكون تيار العطل

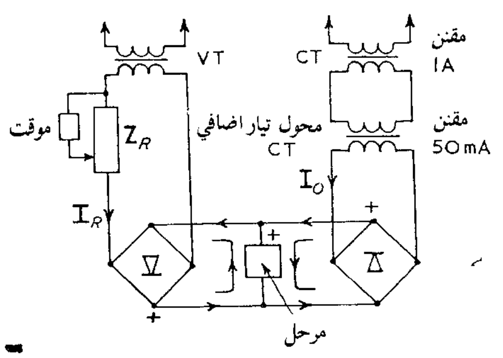
$$I = E/(Z_s+Z_f) \qquad [1.2]$$

ويقوم المرحل بمقارنة قيم الثانوي للفولتية V والتيار I (لذا يسمـى احياناً بالمقارن) في الدائرة المبينة في الشكل 1.2 . بحيث يقيس نسبتيهما والتـي تكون ممانعة Z_m حيث ان

$$Z_m = \frac{V/\text{V.T. نسبة}}{I/\text{C.T. نسبة}} = Z_f\,\frac{\text{C.T. نسبة}}{\text{V.T. نسبة}} \qquad [1.3]$$



الشكل 1.1 الحماية المسافية (أ) تخطيطياً (ب) رسم الزمن / المسافة



الشكل 1.2 دائرة مرحل مسافي (مرحل الملف المتحرك)

وتسمى Z_m ، وهي الممانعة المقاسة ، او الممانعة الظاهرية عند اطراف المرحل ، بالممانعة الثانوية . ويعامل محول التيار المساعد C.T. على انه جزءا من المرحل ، بحيث انه في المعادلة [1.3] ، تشير C.T. الى محول تيار الخط فقط . ان وصول المرحل ، هو المسافة من نقطة التشغيل الى نقطة العطل ويمكن ان تعطى بدلالة المسافة او بممانعة الابتدائي او الثانوي . وتشير بصورة عامة الى المرحل عند مستهل الاشتغال ، اي عند حد معايرته . وبسبب المقومات السيليكونية للدائرة تكون قيمة ممانعة الثانوي كمية لا اتجاهية .
ويقوم المقارن بمقارنة الكميات المتشابهة ، التيار على وجه التحديد ، بحيث يبدل خرج محول الفولتية V.T. الى تيار يدعى بالتيار الكابح I_R ، بسبب وجود الممانعة Z_R ، التي تدعى بالممانعة الكابحة . ويزود محول التيار C.T. تيار التشغيل I_O . وتمثل التيارات المقومة التيارات الدوارة للمنظومة (انظر الجزء الاول ، الفقرة 9.5.1) وعليه يكون تيار المرحل هو الفرق العددي بين هذه التيارات . اما المرحل فيكون من النوع ذي المغناطيس الدائم ، متحرك الملف (كالذي يستخدم في مضخمات الصوت) يشبه الموصل الذي استخدم في الشكل 9.20 من الجزء الاول من هذا الكتاب . ان تيارا اكبر من تيار التنظيم يدخل عند الطرف الموجب سوف يتسبب في غلق نقاط تماس المرحل ويبدأ بافلات قاطع الدورة عند A فقط (ولايكون ذلك الا عند A) . لذا فان خرج محول التيار C.T. يعمل على تشغيل المرحل بينما خرج محول الفولتية V.T. يعمل على كبحه . ولخط متجانس تتناسب Z_f وكذلك Z_m، مع طول الخط من نقطة الترحيل الى نقطة العطل : وعلى هذا الاساس يعين المرحل المسافي موقع العطل . اما تيار التنظيم فهو تيار المرحل الذي يسبب قوة كافية للتغلب على فعل القصور الذاتي وفعل الاحتكاك وفعل نابض الارجاع . وخلال عطل داخلي ، يجب ان يكون تيار المرحل عدة اضعاف تيار التنظيم لضمان الاشتغال السريع .

ان مسافة انتقال ملامسات المرحل تكون صغيرة . عليه يكون الاشتغال لحظيا (60 ملي ثانية) . والملف يكون ملفوفا على مشكل من الالمنيوم ليهيىء اخمادا للاهتزاز ضد تيارات التوافقيات او القوى الخارجية .

قد يظهر ان المرحل يمكنه التمييز بين الاعطال الخارجية والداخلية الى AB وذلك بتنظيم مكونات الدائرة بحيث تكون تيارات التشغيل والكبح متساوية لعطل عند B . واذا ماتحركت نقطة العطل نحو AB ، فان Z_f سوف تنقص وكذلك تنقص V . ولكن I_r سيزداد فيشتغل المرحل . وبالاسلوب نفسه فان عطلاً في BC

يكبح المرحل . وبسبب السماحات في اجزاء الدائرة فانه لايمكن لدقة القياس ان تكون تامة لذا فمن المعتاد ان ينظم المرحل لممانعة ثانوي مناظرة الى 80% من ممانعة AB . بذلك يطلق على المرحل بالمرحلة الاولى للمرحل A (معلم بالرمز A1 في الشكل 1.1 (ب)) . وتحل مسألة حماية الـ 20% الباقية من AB بتغير تنظيم المرحل حتى يصل الى 50% داخل المنطقة BC . وذلك بفتح ملامسات الموقت الموضح في الشكل 1.2 وبذلك تزداد المقاومة الكابحة Z_R (وقد تستخدم طرق اخرى في الحياة العملية) . ان هذا يقلل من التيار الكابح ، ويعيد الى المرحل توازنه . ويجب تقليل تيار التشغيل فيتم تقليل تيار العطل اذا مازادت Z_r . ويطلق على المرحل هنا مرحل A ، المرحلة الثانية . ويعلم بالرمز A2 ، وينبغي ان يميز المرحل A2 مع المرحل B1 لذلك فان التغير من A1 الى A2 يتم تأخيره زمنيا بـ 0.3 ثانية وذلك لكي تتم ازالة الاعطال في الـ 50% الاولى من BC بوساطة B1 في زمن مقداره 60 ملي ثانية زائدا زمن قاطع الدورة في B (0.15 ثانية) . زائدا حد امان معقولا . وقد تمت مناقشة مديات زمن التمييز في الجزء الاول من هذا الكتاب الفقرة 9.5 من الفصل التاسع . وعلى هذا الاساس فان المنظومة المسافية لها عيب في كونها منظومة لاوحدية ذات تدرج زمني مع ازالة بطيئة للاعطال في المرحلة الثانية ، ولكنها تعطي فعلا ازالة لحظية الى 60% من المنطقة على جهتي المنطقة نفسها . لذا تتفوق بصورة كبيرة على منظومة الزمن العكسي (I.D.M.T.L.)

ذلك لان الازمنة تكون هي نفسها لكل منطقة وليست متراكمة باتجاه المصدر . ولاسباب اقتصادية ، يستخدم عادة المرحل نفسه لكلتا المرحلتين (الاولى والثانية) . لذلك فان اي فشل في المرحلة الاولى يسبب فشلاضمنيا في المرحلة الثانية . ولاعطاء حماية ساندة ، تضاف منظومة حماية مسافية منفصلة تستطيع ان تصل الى 25% باتجاه CD وتدعى هذه بالمرحلة الثالثة . وتؤخر بزمن مقداره 0.3 ثانية اخر . ومنظومة المراحل الثلاث هذه تسمى المنظومة المسافية الثلاثية الخطوة (السلمية) . فاذا حصل عطل ما ضمن مدى وصول A3 فانه سوف يباشر بتشغيل مرحل توقيت . واذا كان العطل ضمن الـ 80% الاولى من AB ، فان A1 يجب ان يشتغل لحظيا ويقوم بافلات قاطع الدورة عند A . واذا كان هذا الافلات لايتم بعد 0.3 ثانية فان الموقت سوف يحول A1 الى A2 وذلك بفتح الملامسات التي تكون في حالة غلق طبيعي في الشكل 1.2 وهذا يجب ان يزيل الاعطال في الـ 20% التي في النهاية (ويتم ذلك أيضاً في قاطع الدورة A) . اما اذا مرت 0.6 ثانية ولم يتم ازالة العطل خلالها فان الموقت سيفلت قاطع الدورة عند A . وعلى الطالب ان يكمل هذه المناقشة لما تبقى من

مدى وصول $A3$. بفرض ان هناك منظومات مسافية ثلاثية الخطوة منصوبة عند B وكذلك عند C . والنسب 50%, 80% وكذلك 25% المشار اليها اعلاه يمكن تغيرها وعلى الطالب ان يجد مدى التغيير الخاضع الى التحديدات المنصوص عليها بحيث لايمكن عنده فقدان التمييز ، اي بدون ان تتداخل الخواص الزمنية . ويمكن ايضا تغيير مقدار الحد الزمني المأخوذ وهو 0.3 ثانية (ليتوافق مع زمن قاطع الدورة الكلي) ولكن لايحتمل ان يكون اقل من 0.25 ثانية .

قد تنصب المنظومات المسافية عند كلا طرفي المغذيات جميعاً بحيث يكون كل مغذ منطقة محمية ، وجميعها تشتغل ضمن مديات المناطق الخاصة بها : فتلك التي تصل مدياتها الى اليمين يمكن توضيحها بالأزمنة الموجبة . أما تلك التي تصل الى الشمال فتكون لها ازمنة « سالبة » ، في الشكل 1.1 (ب) .

وتكون المنظومات المسافية من النوع اللاوحدي وذلك لكونها تقوم بتشغيل قواطع الدورة المحلية الخاصة بها فقط . والمنظومة التي تمت مناقشتها في اعلاه هي لا اتجاهية حيث انها تجري العملية نفسها لتيار عطل معين سواء كان انسيابه من قضبان التوزيع اواليها : وتسمى منظومة الممانعة الخالصة (البسيطة ، والتي تستخدم مرحل بدون ملحقات) .

وتفترض المناقشة السالفة ان تغذية العطل يكون عند A. فقط . وعلى الطالب الان ان يتأمل تاثير تغذية عطل ثلاثي الطور من التوليد عند B (انظر الجزء الاول ، الفقرة 8.2) وذلك بوضع العطل ضمن الـ 50% الاولى من المنطقة BC ، ويجد فيما اذا كان المرحل A2 متجاوز الوصول ام ناقص الوصول ويقال عن المرحل انه متجاوز الوصول اذا اشر مسافة عطل اكبر من المسافة الحقيقية (انظر الامثلة)

1.2.1 ممانعة العطل بوصفها دالة لنوع العطل :

FAULT IMPEDANCE AS A FUNCTION OF THE TYPE OF FAULT

لقد تمت الاشارة لحد الان الى اعطال ثلاثية الطور ، اما الان فتأمل انواعا اخرى من العطل . وافرض للسهولة . ان ممانعة المصدر تكون مهملة اي ان $\mathbf{V} = \mathbf{E}$. اما الرموز فهي تلك التي استخدمت في الجزء الاول ، الفصل 8 ، وتتابع الاطوار هو *abc.* (اي a ثم b ثم c) . افرض ان $\mathbf{Z}_1$ و $\mathbf{Z}_2$ و $\mathbf{Z}_0$ هي ممانعات التتابع الموجب والسالب والصفري للخط (انظر الجزء الاول ، الفصل 2) من نقطة المرحل (التتبع)

الى نقطة العطل . والذي سيحدث عند نقطة ثابتة على الخط ولجميع الاعطال . اما العلاقات الرياضية التي سيتم ايجادها فسوف تكون بدلالة ممانعة الابتدائي . اي الممانعة الظاهرية كما هي مقاسة على جهة الابتدائي لمحول الفولتية V.T. ومحول التيار C.T. والغرض من المثال ان يبين ان ممانعة الابتدائي تكون دالة لنوع العطل . ولابتكار الطرق التي تتطلب فقط تنظيم المرحل وفقا لها بدلالة ظرف عطل ثلاثي الطور اي بدلالة ممانعة التتابع الموجب :

(أ) عطل ثلاثي الطور $\mathbf{I}_a = \mathbf{E}_{ae}/\mathbf{Z}_1$

ممانعة الابتدائي = $\mathbf{E}_{ae}/\mathbf{I}_a = \mathbf{Z}_1$

(ب) عطل ارض على الطور a

$$\mathbf{I}_{a1} = \mathbf{I}_{a2} = \mathbf{I}_0 = \mathbf{E}_{ae}/(\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_0)$$

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_0 = 3\mathbf{E}_{ae}/(\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_0)$$

ممانعـــة الابتدائـــي = $\mathbf{E}_{ae}/\mathbf{I}_a$

$$= (\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_0)/3 = (2\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_0)/3 = \mathbf{Z}_E \quad [1.4]$$

بما ان $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2$ لخط معين : فان $\mathbf{Z}_E$ تدعى بممانعة دارة الارض . واذا كان $\mathbf{k} = \mathbf{Z}_0/\mathbf{Z}_1$. تكـون

$$\mathbf{Z}_E = \left(\frac{2+\mathbf{k}}{3}\right)\mathbf{Z}_1 \quad [1.5]$$

ويطبق التحليل السالف فقط في حالة ما اذا مرت جميع تيارات التتابع الصفري خلال محول التيار C.T. . اي اذا كان المصدر مؤرض عند نقطة واحدة فقط : ولايتحقق لمنظومة قدرة متعددة التأريض – (انظر لاحقاً) . لذا فاذا كانت $\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}$ (ولهذه الحالة فقط) تكون ممانعة الابتدائي لعطل ارض هي نفسها مثل التي لعطل ثلاثي الطور : والاّ تكون دالة للعامل $\mathbf{k}$. وتكون X_0 اعتياديا حوالي 2 الى 4 مرات بقدر X_1 ومما يجب ملاحظته ان Z_0 تتضمن مقاومة مسار الارضي خلال الأرض وأسلاك الأرضي المعلقة في الهواء أو خلال اي منهما . وتحل هذه المشكلة باستخدام مرحِلات منفصلة للاعطال الطورية ولاعطال الارض . وثلاثة من كل واحدة للاطوار الثلاثـة .

(ج) عطل طور – الى – طور عبر الطورين b و c

$$\mathbf{I}_{a1} = -\mathbf{I}_{a2} = \mathbf{E}_{ae}/(\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2)$$

$$\mathbf{I}_0 = 0$$

$$\mathbf{I}_b = -\mathbf{I}_c = h^2\mathbf{I}_{a1}+h\mathbf{I}_{a2} = (-j\sqrt{3})\mathbf{I}_{a1}$$

ممانعة الابتدائـــي $= \mathbf{E}_{ae}/\mathbf{I}_b$

عدديا $= (2/(-j\sqrt{3}))\mathbf{Z}_1 \simeq 115\%$ of Z_1

ان نسبة الاختلاف هذه التي مقدارها 15%, زائدا سماحا مقداره حوالي 5% لدقة القياس . كانت السبب في اختيار حوالي 80% من وصول المرحلة 1 لمنظومة مسافية غير معوضة (انظر الفقرة 1.2.2) عاملة على مغذي احادي – الدائرة يتغذى من جهة واحدة فقط .

(د) عطـل – أرض عـــلى الطــوريــن b و c.
على الطالب ان يحلل هذه المسألة . بأن يلاحظ ان هناك اختياراً للتيار اي $\mathbf{I}_b$ أو $\mathbf{I}_c$.

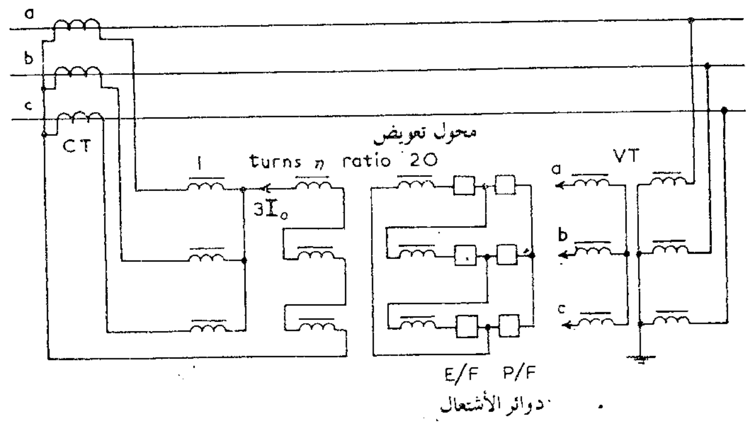
1.2.2 تعويض المرحلات المسافية : COMPENSATION OF DISTANCE RELAYS

(1) تعويـــض عطـــل الطـــور : *Phase-fault compensation*

في الامكان رفع نسبة الاختلاف المذكورة في أعلاه ومقدارها 15% من مرحلات عطل الطور وذلك باستخدام الفرق الطوري لتيارات الخطين حيث يمكن عمل هذا بربط محولات التيار على شكل مثلثي . وكذلك سوف تكون الفولتية المستخدمة هي فولتية خط الى خط (وليست فولتية خط الى الأرض) .

(أ) عطل ثلاثي الطـــور .

$$\text{الممانعة الابتدائية} = \mathbf{E}_{ab}/(\mathbf{I}_a-\mathbf{I}_b)$$
$$= ((\sqrt{3}\underline{/30^\circ})\mathbf{E}_{ae})/((\sqrt{3}\underline{/30^\circ})\mathbf{I}_a)$$
$$= \mathbf{Z}_1$$



الشكل 1.3. تعويض استبقائي . مرحلات عطل ارضي (E/F) تأخذ فولتية الطور. ومرحلات عطل طور (P/F) تأخذ فولتية خط

(ب) عطل طور الى طور على الطورين b و c .

$$\text{المانعة الابتدائية} = E_{bc}/(I_b - I_c)$$

$$= \frac{(-j\sqrt{3})E_{ae}}{(-j2\sqrt{3})(E_{ae}/2Z_1)}$$

$$= Z_1$$

(جـ) عطل طور الى طور الى الارض على الطورين b و c ومرة اخرى . يترك هذا التحليل الى الطالب ليبين ان المانعة الابتدائية لها قيمة تساوي Z_1.

ان منظومة مسافيه لعطل طور معوضة (أنظر الشكل 1.3) تستخدم محولات تيار مساعدة مربوطة بشكل مثلثي على جهة الثانوي لها لتزود دائرة تشغيل المرحل . والتي تكون نجمية الربط : ودائرة الكبح تكون مربوطة بشكل مثلثي بحيث تأخذ فولتية الخط من جهة الثانوي لمحول الفولتية .V.T . أما ثانوي محول الفولتية فيكون نجمي الربط ومقننا عند 110 ف عبر الخطوط و 63.5 ف من الخط الى المحايد . ويكون الأبتدائي مربوطا بشكل نجمي أيضا ومؤرضا مباشرة عند نقطة محايدة . أما محول الفولتية V.T فيكون خازنا من ثلاثة محولات احادية الطور . أو المكافيء المغناطيسي لها . وليس من النوع الثلاثي الأفرع ذي القلب (أنظر الجزء الأول . الفقرة 6.10) .

(2) تعويض العطل الأرضي *Earth-fault compensation*

تستخدم المنظومات المسافية بصورة رئيسية مع منظومات القدرة التي تشتغل عند 132 ك . ف فأعلى . حيث تكون كل نقطةتفرع نجمي مؤرضة مباشرة (تأريض مباشر

متعدد) . ولمثل هذه المنظومات يوزع تيار التتابع الصفري الى الأرض الراجع عند نقطة العطل نفسه على اكثر من محايد واحد (أنظر الجزء الاول . الفصل 8 . مسألة 32) . ولذلك تعتمد كمية تيار التتابع الصفري عند كل نقطة مرحل على ترتيبات التأريض . وهذا التعقيد يمكن التغلب عليه باستخدام تعويض العطل الأرضي مع مرحلات العطل الأرضي : وهناك طريقتان سوف تتم مناقشتها .

التعويـــض الأستبقائـــي : *Residual compensation*

لعطل ارضي على الطور a تكون الفولتية عند نقطة المرحل

$$\mathbf{V}_{ae} = \mathbf{I}_{a1}\mathbf{Z}_1 + \mathbf{I}_{a2}\mathbf{Z}_2 + \mathbf{I}_0\mathbf{Z}_0$$

وتستخدم دائرة التعويض الأستبقائي محولات تيار مساعدة لتضيف . الى تيار العطل $\mathbf{I}_a$. جزء من التيار المتبقي $\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c = 3\mathbf{I}_0$ ويختار ذلك بحيث ان المرحل يقيس $\mathbf{Z}_1$. لذلك

$$\frac{\mathbf{V}_{ae}}{\mathbf{I}_a + n(3\mathbf{I}_0)} = \frac{(\mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2})\mathbf{Z}_1 + \mathbf{I}_0\mathbf{Z}_0}{\mathbf{I}_{a1} + \mathbf{I}_{a2} + \mathbf{I}_0 + 3n\mathbf{I}_0} = \mathbf{Z}_1$$

و

$$n = (k-1)/3 \qquad [1.6]$$

حيث $k = Z_0/Z_1)$,

وهذه النتيجة لاتعتمد على $\mathbf{I}_0$. وبالتعويض في [1.5] عن k نجد أن :

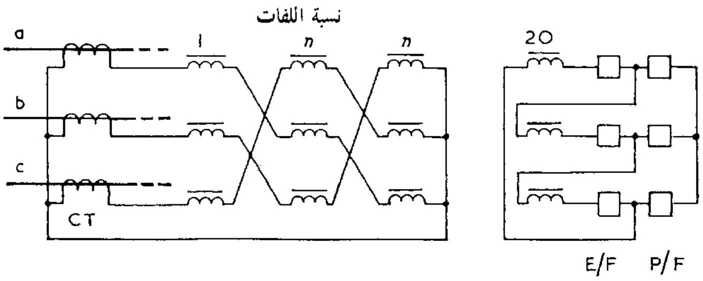
$$n = (Z_E/Z_1) - 1 \qquad [1.7]$$

ويبين الشكل 1.3 دائرة تعطي تعويض عطل الطور والعطل الارضي الأستبقائي كلاهما حيث من الواضح ان n يجب ان يكون كمية لا اتجاهية . على الطالب ان يتحقق من التحليلات السالفة متذكرا وجوب استخدام العلاقات الطورية عدا أنه يجب التعبير عن النتائج النهائية بعلاقة رقمية . وسبب ذلك هووجود الدوائر المقومة .

عند حدوث عطل ارضي على منظومة متعددة التأريض . يمر تيار عطل في الأطوار السليمة (الصحيحة) . ويمكن الحصول على تعويض عطل ارضي وذلك باضافة جزء n من تيار كل من الطورين السليمين الى تيار العطل في الطور العاطل . بحيث ان الممانعة الأبتدائية المقاسة تكون ممانعة دارة الأرض Z_E . والمعرفة بالمعادلة [*1.4*] . وهذه الدائرة مبينة في الشكل 1.4 : وتحل هذه الدائرة مكان محول التعويض المبين في الشكل 1.3 .

تمريناً للطالب يترك له ان يبين ان

$$n = \left|\frac{\mathbf{Z}_0 - \mathbf{Z}_1}{\mathbf{Z}_0 + 2\mathbf{Z}_1}\right| = \left|\frac{\mathbf{k}-1}{\mathbf{k}+2}\right|. \qquad [1.8]$$



الشكل **1.4** تعويض الطور السليم .

قد يتبين أنه بالأمكان تنظيم منظومة مسافية تامة التعويض لوصول مقداره 95% للمرحلة الأولى من طول المغذي . ولكن عملياً يستخدم تنظيم حوالي 70% فقط لخطوط ثنائية الدائرة مع توليد عند قضبان التوزيع جميعاً ليعطي سماحاً لتجاوز وصول المرحل المتسبب عن : (أ) ازدواج المحاثة المتبادل على الخطوط الثنائية الدائرة . (ب) التأثيرات العابرة على محول الفولتية ومحول التيار للمرحل (انظر الفقرة 1.5) . (ج) تأثير الأختناق بسبب التغذية الداخلة للتيارات من الدوائر غير العاطلة وكذلك تأثير اختلاف مقادير تغذيات العطل عند جهتي المغذي كلتيهما (انظر الأمثلة) .

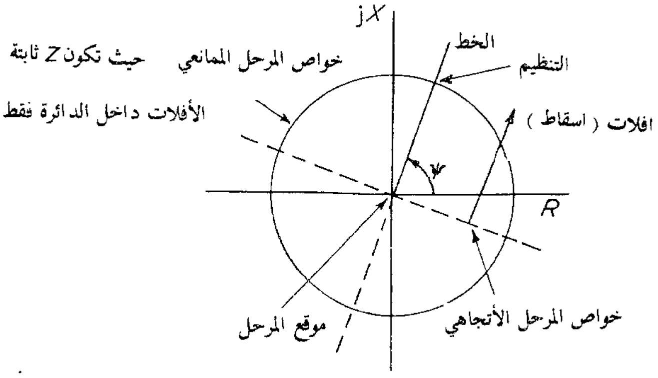
1.2.3 المرحلات المسامحية المستقطبة (مهو) . والمرحلات المسامحية المنزاحة والمرحلات المفاعلية

POLARISED MHO, OFF-SET MHO AND REACTANCE RELAYS

يحدد منحنى الخواص لمرحل ما حافات الاشتغال له ويرسم هذا المنحنى عادة بوصفه محلاً هندسياً للنقطة (R, X) حيث تكون $Z = R+jX$ هي التنظيم لذلك المرحل : انظر الشكل 1.5 : ويجب الاعتناء عند رسم هذا المنحنى لكي يكون واضحاً اي جانب من المسار سيفلت وايهما سيستقر . وترسم ممانعة الخط المحمي على المحاور نفسها وتكون خطاً مستقيماً يميل بزاوية ممانعة الخط ψ على محور المقاومة R حيث

$$\tan\psi = \frac{\text{مفاعلة الخط}}{\text{مقاومة الخط}}$$

اما المرحل الممانعي الخالص (بدون ملحقات) الذي تمت مناقشته في الفقرة 1.2 فيكون لااتجاهياً ويقيس مقدار ممانعة دارة العطل فقط (بغض النظر عن زاوية الطور) . لذا تكون خواصه (الشكل 1.5) دائرة . متمركزة في نقطة الاصل . وبنصف قطر مساوٍ لتنظيمه . ويشتغل المرحل لاي ممانعة لدارة العطل (التي يتم عدها نقطة) في داخـــل



الشكل 1.5. مرحل ممانعة خالص . مساحة التشغيل داخل دائرة مع سيطرة اتجاهية لتحديد مسافة التشغيل الى نصف الدائرة العلوي .

الدائرة . ويمكن جعل المرحل اتجاهياً باضافة مرحل واطميتري (انظر الجزء الاول . الفقرة 9.4.4) . ولكن مثل هذه المنظومات قد تم ابدالها بالمرحلات التي سنأتي على ذكرها الان .

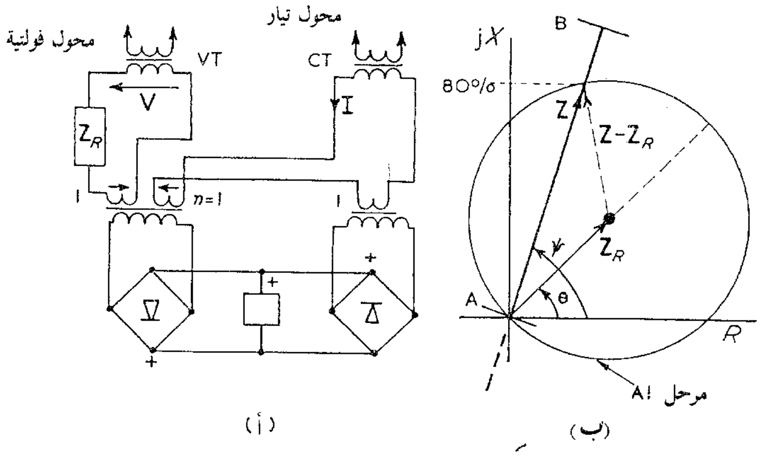
المرحـل المسامحـي المستقطـب (MHO)

ان المرحل المسامحي هومرحل قياس مسافة ويكون اتجاهياً دوماً . اما الدائرة الخاصة به فمبينة في الشكل 1.6 (أ) حيث تم استخراجها من الشكل 1.2 باضافة محولات مازجة بحيث ان التيارات التي تكون بدرجة من التناسب لفولتية وتيارخط النقل يمكن اضافتها طورياً . ويتم الحصول على مرحل مسامحي (MHO) وذلك بطرح خرج التيار لمحول التيار .C.T من خرج محول الفولتية .V.T للحصول على التيار الكابح الكلي . حيث ان المرحل سوف يشتغل عندما

$$|\mathbf{I}| \geqq \left|\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_R}-\mathbf{I}\right|$$

$$|\mathbf{Z}_R| \geqq \left|\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}}-\mathbf{Z}_R\right|$$

$$|\mathbf{Z}_R| \geqq |\mathbf{Z}-\mathbf{Z}_R|, \qquad [1.9]$$



الشكل 1.6 مرحل مسامحي (Mho) (أ) دائرته الكهربائية (ب) خواصة (بدون دائرة الأستقطاب) .

حيث $Z = V/I$ هي ممانعة العطل مقاسة بالأومات الثانوية (في جهة الثانوي) . (ينبه الطالب هنا ليكون حذراً جداً عندما يتعامل مع المعادلات المتباينة وخاصة تلك التي تتضمن مطورات) . ان خواص المرحل هي دائرة ، تمرمن خلال نقطة الاصل ، ويعطى مركزها بالنسبة الى محور المقاومة R بالقيمة $Z_R = Z_R\underline{/\theta}$: حيث يطلق على θ الزاوية المميزة (أوزاوية العزم الاقصى) للمرحل . اما تنظيم المرحل (بالاومات الثانوية) فيعطى بوساطة القطر ($2Z_R$) للدائرة . لذا فان

[1.10] وصول المرحل = تنظيم المرحل × $\cos(\psi-\theta)$

ويشتغل المرحل لاية ممانعة عطل داخل الدائرة .

واذا اخذنا [1.9] بوصفها معادلة فبالامكان تحويلها الى معادلة دائرة بالاحداثيات القطبية . واذا كان العطل خلف المرحل ، فعندئذ تنعكس قطبية تيار محول التيار C.T. بالنسبة الى فولتية محول الفولتية V.T. . وبذلك يزداد فعل الكبح بينما لايتغير فعل التشغيل ذاته : وعلى هذا الاساس يكون المرحل اتجاهياً دوماً .

عندما تكون $V = 0$، اي ان العطل قريب من نقطة المرحل (التتبع) (عطل قريب جدا ، يصبح اشتغال المرحل غير مؤكد . (انظر [1.9]) . وتحل هذه المسألة باضافة فولتية الى جهة الكبح تسمى بفولتية الاستقطاب والتي يتم الحصول عليها من زوج من الاطوار السليمة (الصحيحة) . ويدعى المرحل الحاصل بالمرحل المسامحي (mho) المستقطب : ولكن كلمة « مستقطب » تحذف في معظم الاحيان لذا يعني المرحل المسامحي في المجالات العملية مرحل مسامحي مستقطب . ان طرق ربط وتحليل المرحل المسامحي المستقطب معروفة ويمكن الحصول عليها في المراجع ، على سبيل المثال Electricity Council, Volume 1, page 385) . وقد سميت المرحلات المسامحية بهذا الاسم لان خواصها هي خط مستقيم عندما ترسم على محاور (G, B) حيث $Y = G-jB$: حيث ان المقلوب الهندسي للدائرة هوخط مستقيم . (ومنذ ظهور نظام وحدات S.I. العالمية ، تم ابدال المهو (mho) بالسيمنس وحدةً لقياس المسامحة) .

واذا كان العطل عند محول الفولتية V.T. عطلاً ثلاثي الطور فلا توجد في هذه الحالة فولتية استقطاب . ولحل ذلك فان هناك طريقة تتضمن ادخال متسعة توال في دائرة الاستقطاب بحيث تولف تلك الدائرة الى تردد 50 هرتزمع جعل اطراف الابتدائي

لمحول الفولتية .V.T مقصورة الدائرة . ويدعى هذا الحل بفعل الذاكرة . ان الدائرة المتذبذبة تبقي على تيار الاستقطاب لعدة دورات بعد لحظة حدوث العطل ، وبذلك تمكن المرحل من القياس بصورة صحيحة . حتى هذا سيفشل اذا كان محول الفولتية .V.T على جهة الخط من قاطع الدورة عندما يغلق هذا على عطل ثلاثي الطور

المرحل المسامحي المنزاح : *Off-set mho relay*

هذا المرحل هو مرحل مسامحي (mho) كما مبين في الشكل 1.6 الا ان جزء كسرياً $n < 1$ من تيار محول التيار .C.T الخارج يتم حقنه في دائرة الكبح . ويشتغل المرحل عندما يكون

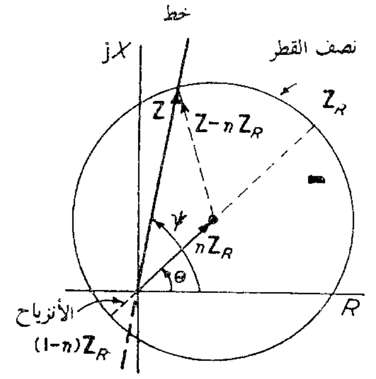
$$|\mathbf{I}| \geqq \left|\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_R} - n\mathbf{I}\right|$$

$$|\mathbf{Z}_R| \geqq |\mathbf{Z} - n\mathbf{Z}_R| \qquad [1.11]$$

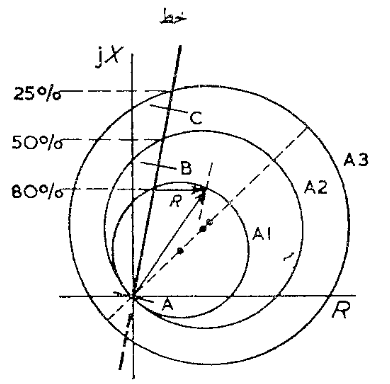
ان خواص المرحل مبينة في الشكل 1.7 حيث تقع مساحة التشغيل داخل الدائرة . وتعطى الازاحةبالعلاقة $(1-n)\mathbf{Z}_R$. وهذا المرحل يعمل عندما يكون $\mathbf{V} = 0$ ويعمل ايضاً لاعطال على مسافات قصيرة خلفه . اي يعطي بعض الحماية الساندة (حماية احتياطية) لقضبان التوزيع . والقيمة النموذجية للانزياح هي 10% من طول المنطقة المحمية .

منظومـة مسافيـة نموذجيـة لاعطال الطـور والارض

وهذه مبينة في الشكل .1.8 . حيث ان المرحلة 1 تكون مرحل قياس مسافة مهو (مستقطب) منظم لحوالي 80% من طول الخط المحمي AB . ويتبدل بعد مرور حوالي 0·3 ثانية ليكون مرحل المرحلة 2 عندما يتجاوز تنظيمه حوالي $1\frac{1}{4}$ المنطقة المحمية . ومرحل المرحلة 3 الذي يكون مرحلاً ثلاثي القطب ومنفصلاً بصورة تامة ، هو مرحل مسامحي منزاح منظم ليصل الى حوالي مرتين وربع اكثر من المسافة المطلوبة ، وهذا يبدأ تشغيل مرحلي توقيت لعطل ضمن مدى وصوله . ويبدل مرحل التوقيت الاول قياس المرحلة 1 الى المرحلة 2 بحوالي 0·3 ثانية بينما يقوم الثاني باسقاط قاطع الدورة عند A بحوالي 0·6 ثانية بعد لحظة حدوث العطل (اذا لم يكن العطل قد تمت ازالته) . وتبين أعلام التأشير المستخدمة في المرحلات نوع العطل ومنطقة وقوعه .



الشكل 1.7 انزياح المسامحة .



الشكل 1.8 مشروع عطل طور نموذجي . يبين مقاومة القوس الكهربائي (R) .

مثال محلول 1.1

خط ذو فولتية 132 ك.ف يتكون من مقطعين . الاول AB بطول 96·5 كم والثاني BC بطول 64 كم . والممانعة $Z_1 = 0{\cdot}435/70^\circ$ أوم / طور – كم . وادنى ميكافولت أمبير للمصدر (مستوى عطل ثلاثي الطور) عند A هو 1500 MVA (باهمال المقاومة) . نسبة محول الفولتية .V.T هي 132 000/110 فولت . اما نسبة محول التيار .C.T فهي 600/1 أمبير . زاوية التمييز للمرحل هي 60° . احسب التنظيم لمرحل مسامحي مستقطب . معوض الطور . عند A الذي سوف يعطي وصولاً للمرحلة 1 مقداره 80% من AB .

افرض عطلاً ثلاثي الطور .

الحـل :

المفاعلة القصوى للمصدر $= \dfrac{132/\sqrt{3}}{1500/(\sqrt{3}\times 132)} = 132^2/1\,500$

$= 11{\cdot}62$ أوم ابتدائي / طور

وصول المرحلة 1 $= 0{\cdot}8\times 0{\cdot}435\times 96{\cdot}5\underline{/70^\circ} = 33{\cdot}6\underline{/70^\circ}$

$= 11{\cdot}48+j31{\cdot}6$ أوم ابتدائي / طور

ممانعة العطل الكلية $= 11{\cdot}48+j43{\cdot}22$

$= 44{\cdot}6\underline{/71{\cdot}18^\circ}$ أوم ابتدائي / طور

تيار العطل الادنى $= (132/\sqrt{3})/44{\cdot}6 = 1{\cdot}71$ كيلو أمبير ابتدائي

أو

$= 1710/600 = 2.852$ أمبير ثانوي

فولتية الخط عند نقطة المرحل (التتبع)

$= \sqrt{3} \times 1.71 \times 33.6 = 99.2$ ك . ف ابتدائي (خط)

$= 99.2/(132/110) = 82.7$ ف ثانوي (خط)

وصول المرحل المعوض $= 82.7/(\sqrt{3} \times 2.852) = 16.8$ أوم ثانوي / طور

ويمكن الحصول على هذه النتيجة بالتعويض في [1.3]

الوصول $= 33.6 \times \dfrac{600/1}{132\,000/110} = 16.8$ أوم ثانوي / طور

تنظيم المرحل للمرحلة $1 = 16.8/\cos(70-60)° = 17.0$ أوم

(والتنظيمات النموذجية المتيسرة هي من 3 الى 20 أوم)

مقاومة القوس الكهربائي

اذا حدث شرعرضي من طور الى طور في خط (أوطور الى البرج (الارض)) فان مقاومة القوس الكهربائي يمكن ان تكون لها قيمة ملموسة . وخاصة لخطوط الفولتية العالية المتباعدة بصورة كبيرة وكذلك لاعطال غيرمزالة في المرحلة 1. . ان مقاومة القوس هذه تضاف الى ممانعة الخط . حتى نقطة العطل . لتنتج الممانعة المقاسة بوساطة المرحل . يبين الشكل 1.8 أن هذا التأثيريمكن تقليله الى الحد الادنى باختيارمرحل له زاوية تمييز (θ) تكون اقل من زاوية الممانعة للخط (ψ) . (وباستطاعة الطالب ان يعيد رسم الشكل مع $\theta = \psi$) ويعطي الكتاب المرجع . مجلس الكهرباء – الجزء الثاني . Electricity Council, Volume 2, page 44 قيماً للزاوية θ كالاتي

فولتية المنظومة . ك . ف :	400	275	132	66	33	11
$\theta°$:	75	75	60	60	45	45

ويعطي وارنكتون Warrington المعادلة التالية لاحتساب المقاومة التقريبية للقوس الكهربائي :

$$R = 16\,300(1.75S + vt)/I^{1.4}$$ اوم

حيث :

S = مسافة الفصل بين الموصلات بالمتر

v = سرعة الريح . كم / ساعة

t = الزمن . ثانية

المرحل المفاعلي : *Reactance relay*

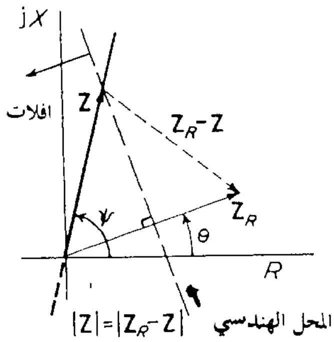
تكون ممانعة دارة العطل الارضي دالة لمقاومات قوس العطل وكذلك دالة لمسار العودة الارضي . وكلاهما يمكن ان يكون متغيراً وليس محدداً . ان هذا يؤثر على الممانعة المقاسة بوساطة المرحل وبذلك يؤثر على تحديد موضع العطل . والطريقة التي يتم بها التغلب على هذه المشكلة تكون بقياس مفاعلة دارة العطل باستخدام مرحل مفاعلي . في هذا المرحل بشكله العام . والذي يسمى بالمرحل الأومي تتغذى دائرة الكبح من خرج محلول الفولتية V.T. بينما تجهز دائرة التشغيل بوساطة فرق الطور بين خرج محول التيار C.T. وخرج محول الفولتية V.T. . لذا فان المرحل الاولي يشتغل عندما

$$\left|\mathbf{I}-\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_R}\right| \geqq \left|\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_R}\right|$$

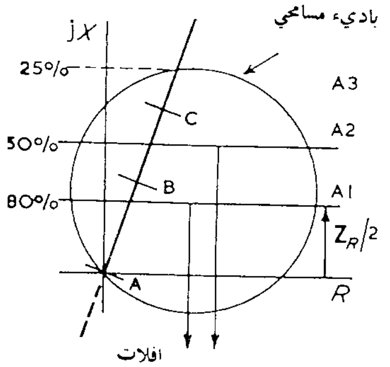
$$|\mathbf{Z}_R-\mathbf{Z}| \geqq |\mathbf{Z}| \qquad [1.12]$$

ويوضح الشكل 1.9 خواص المرحل الاومي : وهي العمود المنصف لممانعة الكبح $\mathbf{Z}_R = Z_R/\theta$ (الحثية) . يمكن اختيار ميل الخواص وذلك باختيار الزاوية θ ويتم افلات المرحل عندما تقع الممانعة المقاسة الى يسار الخواص . وتستخدم مرحلات الاومية احياناً بوصفها مرحلات مقيدة تقوم بمنع قاطع الدورة من الافلات وذلك يفتح ملامسات في دائرة افلات قاطع الدورة تكون مغلقة في الحالة الطبيعية . في المرحل المفاعلي . تكون الممانعة الكابحة هي محاثة بحتة $(\theta = 90°)$. ولكن المثالية هذه لايمكن وجودها فيزياوياً . لذا فانه من اللازم استخدام دوائر ذات طور متغير . ان الخواص هي خط مستقيم افقي وكما موضح في الشكل 1.10 . ويفلت المرحل عندما تقع الممانعة المقاسة اسفل الخواص . شاملة جميع مافي الربعين الثالث والرابع . لذا يكون المرحل المفاعلي لا اتجاهياً .

عندما يكون الخط المحمي قصيراً فان المرحل المفاعلي يكون جديراً بصفة مرحل قياس مسافة لعطل الارض . ويعود ذلك الى ان اية مقاومة قوس متغيرة يمكن ان تكون جزء لايستهان به من ممانعة الدارة .



الشكل 1.9 المرحل الأومي (المقاومي) .



الشكل 1.10 تخطيط عطل ارضي نموذجي

نظام مسافة عطل الارض

يبين الشكل 1.10 نظاما يمكن تطبيقه حيث تحتوي فيه المرحلة 1 والمرحلة 2 على مرحلات مفاعلية . ان هذه المرحلات تكون لا اتجاهية ومعرضة الى الافلات لاعطال خلف نقطة التشغيل ومن المحتمل ايضا ان تشتغل حتى لتيار حمل يسري من الخط المحمي AB الى قضبان التوزيع عند A . لذلك فان المرحل المسامحي الباديء (A3) يكون ضروريا . وليست المسألة وضع مجموعتين من الملامسات للمرحلات على التوالي : ان ملامسات المرحل الباديء تكون مغلقة بالوضع الطبيعي وبذلك فهي تقصي دائرة خرج محول التيار .C.T المساعد رابطة اياه مع المرحل المفاعلي . لذلك فان مرحل قياس المفاعلة لايمكنه البدء في القياس حتى يتأكد المرحل الباديء من ان العطل يكون امام المرحل نفسه

وفي المملكة المتحدة تزود كافة خطوط الشبكة الكبرى بسلك أرضي معلق في الهواء وهذا بدوره يقلل مقاومة مسار العودة الارضي ويجعلها اكثر استقراراً . كذلك فان المرحلات المفاعلية تكون معرضة لعدم الدقة في القياس عندما يمتلك قوس عطل الارض مقاومة ملموسة وكذلك وجود تغذية للعطل من كلا جانبي الخط . وتظهر ممانعة القوس بكونها حاوية على مركبة متفاعلة . كما تقاس بوساطة المرحل المفاعلي . بحيث ان المرحل عند احد الجهات من الخط يتجاوز وصوله بينما يكون المرحل في الطرف الاخر ناقص الوصول (انظر المثال 5) . ولهذه الاسباب يتم استخدام المرحلات المسامحية بدلا من المرحلات المفاعلية . حتى للخطوط القصيرة لان الاولى لها دقة قياس أفضل .

1.2.4 تعجيل زمن المرحلة 2 : ACCELERATION OF STAGE 2 TIME

ان من المساوىء الكبرى للمنظومة المسافية هو بطء المرحلة 2 في ازالة عطل في النهاية البعيدة 30% من المنطقة المحمية AB . وللخطوط المهمة ذات الفولتية العالية جدا فان مثل هذا الزمن الطويل لازالة العطل لايمكن تحمله وذلك بسبب خطر العطب الذي يحدثه العطل وامكانية فقدان استقرارية المنظومة (انظر الفصل 3) .
وعلى كل حال فان مثل هذا العطل يكون ضمن وصول مرحل المرحلة 1 عند B . (ويحمي النهاية الاخرى من الخط AB) والذي يفلت قاطع الدورة عند B وكذلك يبدأ بارسال الاشارة الى النهاية A مستخدما سلكا مرشدا هاتفيا . أو اجهزة ذات موجة حاملة عالية التردد (انظر الفقرة 1.3) أو وصيل اتصال راديوي . وسوف تتم مناقشة هذه المنظومات الثلاث المتباينة باختصار . لكل من هذه المنظومات تكون الاجهزة الاساسية هي المنظومة المسافية ذات التدرج الثلاثي والتي تمت مناقشتها سلفا . وفي حالة غياب او فشل قناة الاشارة . فان كلا منها تعطي حدود تمييز الزمن الطبيعية بين المراحل الثلاث .

منظومة مسافية معجلة

في هذه المنظومة تقوم الاشارة بافلات قاطع الدورة عند A وهذا يحدث فقط اذا شُتغل مرحل المرحلة 1 عند A مسبقا (أو المرحلة 2 اذا كان ذلك مرحلا منفصلا) . لذا فالحماية عند A يجب ان تشتغل في زمن المرحلة 1 من B (60 ملي ثانية) زائدا زمن مرحل الاشارة . وزمن الارسال الذي يبلغ حوالي 70 ملي ثانية . وليس هناك حاجة

لان تكون قناة الاشارة برصانة عالية ذلك لان اي تداخل في القناة لايمكن ان يسبب الافلات الا اذا كان هناك عطل على المنظومة في الوقت نفسه .

المنظومة المسافية ذات الافلات البيني *Intertripped distance system*

يقال عن قاطعي دورة انهما ذوا افلات بيني اذا سبب افلات احدهما افلاتـــا للاخر. وفي المنظومة المسافية ذات الافلات البيني فان اشارة من B تفلت قاطع الدورة عند A بدون الرجوع اولاً الى الحماية عند A . لذلك فان قناة الاشارة يجب ان تمتلك رصانة عالية وتكون كلفتها عادة اكثر من قناة المسافة المتعجلة بسبب التحوطات التي يجب ان تتخذ لمنع الافلات الكاذب نتيجة تداخل القناة (انظر المصدر Electricity Council, Volume 2, pp. 204) وفي حالة القناة الحاملة يكون سبب التداخل بصورة رئيسية من الاشعاع الكهرومغناطيسي (الضوضاء) الناتج عن الشرارات الكهربائية في قواطع الدورة المجاورة والفواصل وفجوات الشرارة عند اشتغال هذه الاجهزة . واحد عيوب الافلات البيني ذي الاشارة الحاملة ان الاشارة يجب ان ترسل خلال العطل عندما يكون العطل قريبا من نهاية الخط : حيث يمكن البرهنة على ان تضاؤل الاشارة يكون عندئذ بأقصى قيمته . ان زمن الافلات البيني ذي السرعة العالية يبلـــغ حوالي 25 ملي ثانية .

المنظومة المسافية المتواشجة (المقيدة) *Interlocked (blocked) distance system*

يمكن عد هذه المنظومة ثنائيا من المنظومة السابقة وذلك لأن الاشارة الخارجة الآن من B تمنع (تقيد) قاطع الدورة عند A عن الافلات . ومرحل المرحلة 2 عند ـ يكون منظما لمدى حوالي $1\frac{1}{2}$ من المناطق (اي AB زائدا حوالي نصف BC) ولكنه الآن يستطيع ان يفلت قاطع الدورة عند A لحظيا . على ان لاتكون الاشارة المقيدة قد تم استلامها بعد . لذلك يتم افلات قاطعي الدورة عند A و B لحظيا لأي عطل مهما كان موقعه في المنطقة AB وعليه تكون المنظومة ظاهريا هي منظومة وحدية . ولمنع قاطع الدورة عند A من الافلات لعطل ضمن النصف الاول من المنطقة BC يبادر مرحل باديء عند B وضمن المنطقة BC باعطاء اشارة تقييد تفتح بدورها ملامسات تكون مقفلة في حالتها الطبيعية في دائرة افلات قاطع الدورة عند A (أو في اي مكان آخر) . وهذا الباديء . الذي يبديء ايضا مرحلات التوقيت . يكون عادة مرحل ممانعي خالصا (الشكل 1.5) وله تنظيم مقداره حوالي 225 ٪ : وليس من الضروري ان يكون هذا المرحل دقيقا جدا اومحصنا من تجاوز الوصول . لكنه يجب ان يكون

سريعاً جداً (1 ملي ثانية) .اما ميزة المنظومة المتواشجة فهي انتقال الاشارة الحاملة على الخط الصحيح AB عند حدوث اعطال خارجية على AB اما التداخل ، في أسوء الإحوال ، فلايؤدي الا الى تأخير التشغيل لاعطال داخلية بزمن لايتعدى زمن المرحلة الاعتيادي . وذلك لكون موقتات المرحلة تتجاوز (لاتمر من خلال) ملامسات المرحل المقيد (الحابس) وتشتمل المنظومة ايضاً على مرحل المرحلة 1 وهو مرحل لحظي اعتيادي منظم لحوالي %70 من AB (لمنظومة حلقية ثنائية الدائرة) ولايعتمد عمله على اية اشارة مقيدة لذلك فهو لايعتمد على التداخل . ويمكن استخدام الاشارة المقيدة للخطوط الاقصر طولاً وكذلك عندما تكون المحولات مربوطة الى الخط مباشرة (اي بدون وجود اي قواطع دورة مسيطرة) . في هذه الحالة الاخيرة يسبب عطل في محول ما افلات قاطعي الدورة عند A و B بصورة لحظية وبذلك يفتح فاصل يعمل بمحرك كهربائي عند محول التغذية ودوائر اعادة الاغلاق الذاتية المؤخرة (انظر الفقرة 1.4.2) ويعيد غلق قاطعي الدورة عند A و B .لتفاصيل اكثر حول منظومة التقييد ينصح الطالب بمراجعة نشرة شركة G.E.C.-E.E. حول موضوع 'Interbloc' carrier-distance relaying .

1.2.5 المنظومات المسافية المأقلدة : SWITCHED-DISTANCE SYSTEMS

قد تشتمل المنظومة المسافية المتكاملة عند كلا طرفي خط على مرحل عطل ارض أو مرحل عطل طور لكل من الأطوار الثلاثة وثلاثة أمثال هذه تكون للمراحل الثلاث بحيث يبلغ مجموع المرحلات الكلي لكل نهاية هو ـ.(زائداً مرحلي توقيت. واحد للمرحلة والآخر للمرحلة 3. زائداً مرحلات مساعدة ودائرة تيار مستمر d.c.). ولاتسوغ هذه الكلفة الا لخط مهم ذي فولتية عالية . أما الترتيب الشائع . والذي يستخدم لفولتية 132 ك. ف فأعلى . فيجمع المرحلتين 1 و 2 وبذلك يقلل عدد مرحلات المسافة الى 12 لكل نهاية. ولجعل المنظومة المسافية اقتصادية لفولتيات 33 ,66 او حتى لـ 11ك. ف. تتيسر هناك المنظومات المسافية المأقلدة . ففي هذه المنظومات . يتم أستخدام مرحل مسامحي واحد للقياس فقط . أما طبيعة العطل فتحددها مرحلات التيار المفرط . من نوع المنتج المنجذب . البادئة حيث توضح في الاطوار الثلاثة وتسلط الفولتية والتيار المناسبين على المرحل المسامحي مع زيادة طفيفة فقط في زمن المرحل الكلي . وقد تظهر بعض التعقيدات في امكانية تبدل نوع العطل قبل القيام بازالته . لذلك يتطلب ان تكون ذروة تيار الحمل أقل من القيمة الدنيا لتيار العطل . واذا كان مستوى العطل

الأدنى للمشروع واطئاً جداً . عندئذ لايمكن استخدام بواديء التيار المفرط وفي هذه الحالة يتطلب استخدام عناصر بادئة ذات ممانعة وهذه تكون كلفتها عاليـــة .

1.2.6 الدقـة . الحساسية والتنظيم :

قد تحدث اخطاء في كل من مرحلات قياس المسافة ومحولات التيار ومحولات الفولتية وكذلك المعلومات عن ممانعة الخط وكذلك طول مسار الخط. ان تنظيم المرحلة 1ـ يكون حرجاً ويتم اختياره بحيث انه تحت أردأ الظروف الممكنة . سوف لايصل الى عطل على قضبان التوزيع في النهايـــة البعيدة من الخط المحمـــي .

تعين الشركة الصانعة لأي مرحل يشتغل ضمن دقة معينة قيمة دنيا لفولتية التشغيل (مثلا : 3٪ من 110 ف (خط) او 63·5 ف/ طور) . ومن المفيد هنا استخدام الوظيفة التبادلية . اي الفولتية الاسمية / فولتية المرحل . وبما ان القيمة الدنيا للنسبة هذه هي 1 . فقد تعرف نسبة الممانعة المميزة .C.I.R للمرحل كما يـــلي : —

$$\text{C.I.R.} = \frac{\text{الفولتية الأسمية}}{\text{فولتية المرحل}} - 1 \quad [1.13]$$

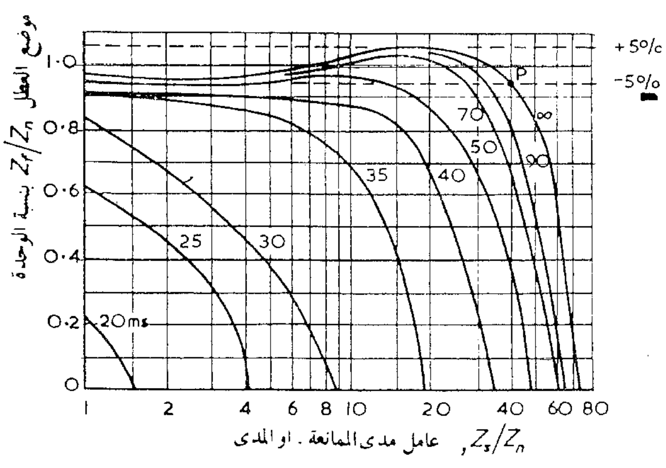
فمثـلا تكون $\text{C.I.R.} = (1/0{\cdot}03) - 1 = 32{\cdot}3).$

ومن [1.1] . ولأي قيمة لـ E

$$\frac{\text{ق . د . ك للمصدر}}{\text{فولتية المرحل}} - 1 = \frac{Z_s + Z_f}{Z_f} - 1 = \frac{Z_s}{Z_f}$$

وكذلك ممانعة العطل (مقتبسة من نشرة شركة Rey·rol'le الرقم (1297) وتعرف القيمة العددية لهذه بنسبة ممانعة (.S.I.R) أي ان

$$\text{S.I.R.} = Z_s/Z_f \quad [1.14]$$



الشكل 1.11 منحنيات الدقة لمرحل عطل طوري مسافي حيث تبين العلاقة بين زمن تشغيل المرحل (ملي ثانية) وممانعة المصدر

وهكذا فلأي مرحل يكون ضمن حدود الدقة المخصصة له تكون

S.I.R. ≦ C.I.R. (للمرحل) [1.15]

وتعرف المواصفات القياسية البريطانية B.S. 3950 نسبة الممانعة المميزة C.I.R. من المتباينة [1.15] . بكونها أقصى نسبة ممانعة منظومة مسموح بها عوضا عن كونها مميزات المرحـــل نفســه .

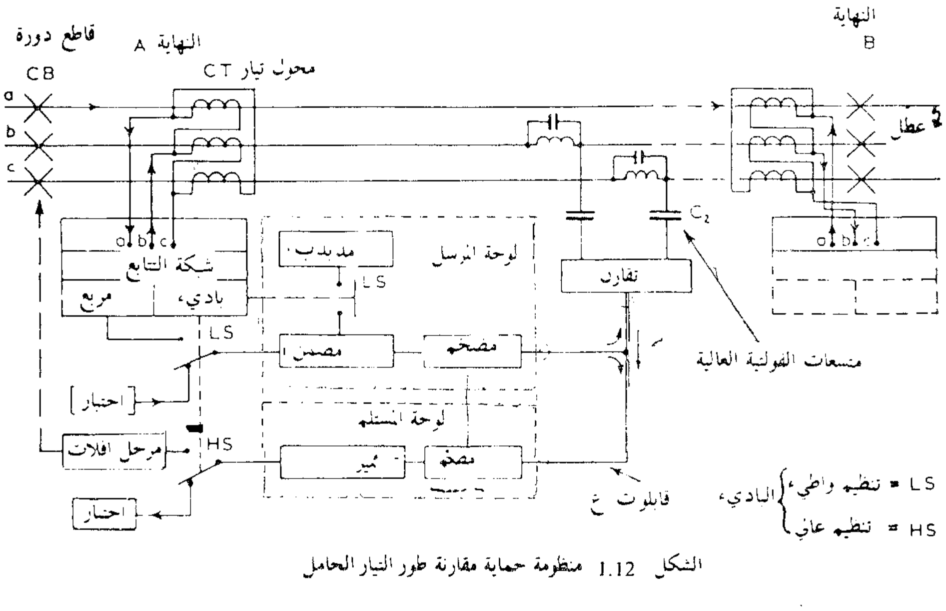
يبين الشكل 1.11 Z_f الى الاساس Z_s ولمجموعة من ازمان اشتغال المرحل . والمنحنيات الخارجية القصوى للمرحل تكون مباشرة على حافة التشغيل . وكلتا الممانعتين Z_f و Z_s معبرا عنها بنسبة الوحدة باستخدام Z_n الاسمية او التنظيم المؤشر للمرحل . حيث تؤخذ هنا Z_n أساسا . اما النقطة P فتبين انه اذا اريد ان يكون المرحل دقيقا ضمن 5% من تنظيمه فيجب ان لاتتعدى ممانعة المصدر 40 مرة بقدر تنظيم المرحل نفسه (كلاهمابالاوم النانوي) وحتى وان كانت كذلك فان زمن التشغيل يكون غير مؤكد . ولأعطاء سماح لتدرج الزمن الفعال قد يؤخذ زمن تشغيل مقداره 70 ملي ثانية حيث

يكون معقولا أكثر . وهذا يعطي نسبة تكون على وجه التحديد أقل من 30 للسماح نفسه الذي قيمتـــه 5%.

1.3 حماية مقارنة الطور ذات التيار الحامل : (مقارنة الطور للترددات العالية) :

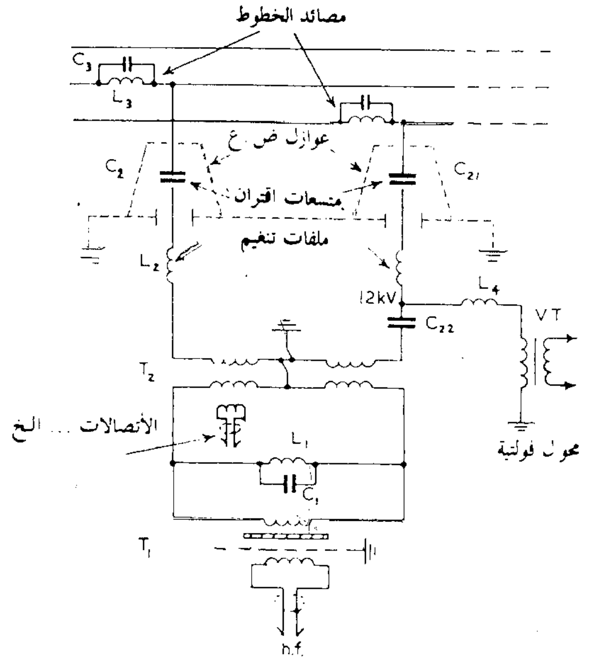
للاختصار تعرف منظومة الحماية هذه بالحماية الحاملة وتكون بديلة للمنظومة المسافية لحماية الخطوط الطويلة المهمة وذات الفولتية العالية والمبادىء الاساسية لكلا المنظومتين تكون بسيطة ولكن تطبيقاتها العملية معقدة وغالية . ان الحماية الحاملة هي منظومة وحدية للحماية . وتحدد المنطقة المحمية بها بمواقع مجموعتي محولات التيار .C.T.s . التي يكون زمن تشغيلها لحظيا . ويستخدم هذا النوع من الحماية خطَّ

القدرة نفسه قناة لنقل المعلومات بهيئة اشارة تردد عال متضمنة تأخذ بعين الاعتبار الظروف عند نهايتي الخط . ويلزم المنظومة الحاملة أجهزة الكترونية ذات حالة صلبة باهضة التكاليف لتوليد اشارة التردد العالي (75 – 400 كيلوهرتز) . وكذلك متسعات فولتية عالية غالية لحقن الاشارة الى خط القدرة : أنظـر الشكـل 1.12 وكـذلـك 1.13 .



الشكل 1.12 منظومة حماية مقارنة طور التيار الحامل

والمبدأ الأساس للحماية الكاملة هو ان التيار I_A الداخل والتيار I_B الخارج من المنطقة AB . في حالة الحمل وكذلك في ظروف العطل الخارجي . يكونان متساويين تقريبا في الطور . بالنسبة الى فولتية المنظومة . بينما يكون هذان التياران في تضاد طوري تقريبا لعطل داخلي (أو ان أحد هذين التيارين يكون صفراً) . ان هذين التيارين يبدآن بنقل اشارات التردد العالي من كل نهاية والى الأخرى . وعند كلتا نهايتي الخط . تتم مقارنة تضمين اشاراتي التردد العالي المحلية والبعيدة فاذا أشرتا الى عطل خارجي . عندئذ تستقر الحماية . والا فانها سوف تفلت قاطع الدورة الموقعي . وبما ان خط القدرة . عندما يحمل اشارة التردد العالي . يعمل هوائياً يشع طاقة الأشارة . حيث ان الأشارة تتضاءل خلال النقل وبكمية متغيرة معتمدة على الظروف الجوية . وازالة تضمين الأشارة المستلمة عند احدى النهايتين لايمكنه اعطاء معلومات تخص اتساع التيار عند النهاية الأخرى . لذلك فأن الأشارة تنقل معلومات تخص الطور للتيار فقط . ومن سياق الكلام فأنه من المفيد ان يقاس الطور بوصفه دالة للزمن وذلك باستخدام نقاط الصفر اللحظية لموجة التيار / الزمن .



الشكل 1.13 تفاصيل اجهزة الأقتران

يبين الشكل 1.12 مجموعتين من محولات التيار مربوطتين بصورة متماثلة بالنسبة الى قضبان التوزيع العائدة لها . لذا فخلال عطل خارجي . ومع ان تيارات الأبتدائي تكون في الطور نفسه بالتقريب . فان التيارات الثانوية المكافئة لها تكون في تضاد طوري تقريباً عندما تغذى الى الشبكات . وفي منظومة حماية حاملة مثالية . فأن التيارين الثانويين هذين سوف يبدآن بنقل اشارة التردد العالي . في اللحظات التي يكون كل تيار منهما موجباً . والذي سيستمر لنصف دورة وكذلك في أنصاف الدورات المجاورة ويكون كلاهما بتردد منظومة القدرة) بحيث يكون في كل مستقبل دخل مستمر لاشارة ت . ع . وتصمم الحماية بحيث يتم افلاتها نتيجة لغياب اشارة ت . ع تتجاوز الزمن المكافيء والذي مقداره حوالي40° (عند تردد القدرة) وخلال عطل داخلي فان الارسال يتم من كلتا الجهتين خلال نصف دورة لذا يحدث فعل الافلات. خلال نصف دورة من اشارة الصفر .

تأمل الآن بعض التعقيدات العملية : —

شبكة التتابع : لغرض تقليل التداخل مع مستخدمي مديات الأمواج العالية التردد (ت . ع) . وهم كثيرون في المملكة المتحدة . فأن أنظمة دوائر البريد لاتسمح بتزويد خطوط (أو خط) القدرة بدخل القدرة الكلي للأشارة (حوالي 10 واط) بصورة دائمية وذلك لكي ترسل الأشارة خلال ظروف العطل فقط . وتحتاج هذه الى مرحل باديء (كاشف العطل) . والمشكلة هي ان تيار العطل الأدنى للشبكة الكبرى (في الصيف +) يمكن أن يكون أقل من تيار الحمل الأقصى (في الشتاء *) لذا فأن الحماية لايمكن بدؤها بوساطة المرحلات البادئة المعتمدة على مقدار التيار فقط . ويتم مد المرحلات البادئة بالطاقة الكهربائية بوساطة خرج شبكة التتابع .

وتعطي شبكة التتابع خرجاً احادي الطور (انظر الجزء الاول . الفقرة 8.5) وهذا الخرج يجب ان يكون معتمداً بصورة خطية على مركبات التتابع الموجب والتتابع السالب لتيارات الخطوط (الاطوار الثلاثة) (اما مركبة التتابع الصفري فيتم التخلص منها بمحولات التيار المربوطة بشكل مثلثي) . لقد ورد في المصدر (Electricity Council, Volume 2, p. 179) أخذ القيمة ($5I_2 - I_1$) لتكون القيمة الاقل حساسية لنوع العطل . ويجب اعطاء اهمية ايضاً الى خرج الشبكة نتيجة الى تيار الحمل

+ هذا في بريطانيا يقابله الربيع في العراق (المترجمان)

* هذا في بريطانيا يقابله الصيف في العراق (المترجمان)

الأقصى وكذلك تيار شحن الخط حيث ان مركبة التتابع الموجب تكون ضرورية لغرض الـكشف عن عطل ثلاثـي الطور .
ويتم استخدام الدوائر التي تتأثر قياساتها بتغير نهوض التيار وبتنظيم لايقل عن 25% من تيار الحمل الـكلـي .وحتى عند ذلك تكون الدائرة معرضة لاعطاء خرج اذا تم توصيل مفاجـيء لحمل ثقيل . وبما ان الحمل يكون مكافئاً لعطل خارجـي . فسوف تستقر الحماية وترسل الموجة الحاملة لفترة قصيرة فقط يكون الحمل خلالها متغيراً . يمكن جعل بعض الدوائر معتمدة على الحمل (منحازة) : وعلى سبيل المثال : ان تنظيم عطل ثلاثـي الطور مقداره 40% في حالة اللاحمل يكون في حالة الحمل و عند التيار المقنن 170% من تيار الحمل المقنن نفسه . ويمكن للشبكة ان تعطـي تنظيم عطل ثلاثـي الطور اقل من الحمل الاقصـى ان تطلب الامر ذلك حينئذ يجب ان لا تسبب هذه الحالة ارسال موجة حاملة لحمل مستقر قيمته اكبر من تنظيم العطـل نفسه .

ولغرض تقليل خرج الشبكة الذي تسببه مركبة التيار المستمر لتيار العطل وكذلك تمورات الخط ...الخ يؤخذ خرج شبكة التتابع من خلال مرشح امرار نطاقـي (حوالـي 25 الى 100 هرتز) .

مرحل البدء (كشف العطل) .

عند اقصى تيار عطل . يجب ان تشتغل مرحلات البدء المنفردة عند *A* و B كليهما بدرجة موثوق بها وسوف تميز حماية الموجة الحاملة بين الاعطال الداخلية والاعطال الخارجية . اما عند تيارات العطل الدنيا فالاحتمال الوارد هو انه بسبب الفرق الطفيف في قيم تشغيل المرحل سوف يعمل باديء واحد فقط . عندئذ تعامل الحماية هذه الحالة على انها عطل داخلي ويتم على اساسها الافلات . حتى لو ان العطل ربما كان خارجياً . ان هذه المعضلة يمكن التغلب عليها باستخدام مرحلين بادئين عند كل نهاية . احدهما واطيء التنظيم (LS) والاخر عالـي التنظيم (HS) وينظمان بحوالـي 25% فوق قيمة التنظيم الواطـيء . اي فوق سماح الخطأ للمرحلات الواطئة التنظيم . ويقوم المرحل الواطئ التنظيم بايصال الموجة الحاملة الى الخط بينما يقوم المرحل العالـي التنظيم بالسيطرة على دائرة الافلات . تأمل تيار خط متزايد القيمة . فاذا اشتغل المرحل واطـئ التنظيم عند A اولاً . تنتقل في هذه الحالة الموجة الحاملة عند A الى المستقبلين كليهما . ويشتغل كاشفا الطور كلاهما . ولـكن لايتم افلات أي من قاطعـي الدورة بسبب عدم اشتغال اي من المرحلين العاليـي التنظيم . واذا ازداد

تيار الخط بحيث يشغل المرحلان الواطئا التنظيم كلاهما . فسوف تميز الحماية بين الاعطال الخارجية والداخلية ولـكن لايكون في امكانها الافلات للعطل الداخلـي . واذا اشتغل المرحل العالـي التنظيم عند A . بسبب زيادة في تيار والخط . عندئـذ سوف يفلت قاطع الدورة عند A اذا كان العطل داخلياً . وذلك في هذه الحالة فقط . يكون التنظيم الفعال للحماية اعلى من المرحلات العالية التنظيم . وسوف يفلت عطل داخلـي مغذى من جهة واحدة فقط . متجاوزاً قيمة التنظيم . قاطع دورتها المحلـي : ولايمكنه افلات قاطع الدورة البعيد . ومن الضروريات الاساسية منع الافلات لعطـل خارجـي اذا اشتغل بادىء واحد فقط ولاي سبب من الاسباب. ان البادىء سوف يضيف حوالـي 20 ملـي ثانية الى زمن ازالة العطل الـكلـي .

المـرّبع : *Squarer*

المرّبع هو دائرة لتشكيل النبضات ويقوم بتبديل خرج شبكة التتابع الى موجه مربعة . ومن الناحية المثالية يجب ان تتطابق أصفار الدخل والخرج زمنياً ويجب ان يكون للخرج نسبة علامة/فراغ مقدارها واحد وعلى مدى $360°$ (عند تردد القدرة) . يوضح الشكل 1.14 (ب) عمل دائرة محدد بسيطة : حيث تعتمد فترة نبضه الخرج بصورة كبيرة على اتساع تيار الدخل المنسوب الى تنظيم المحدد .

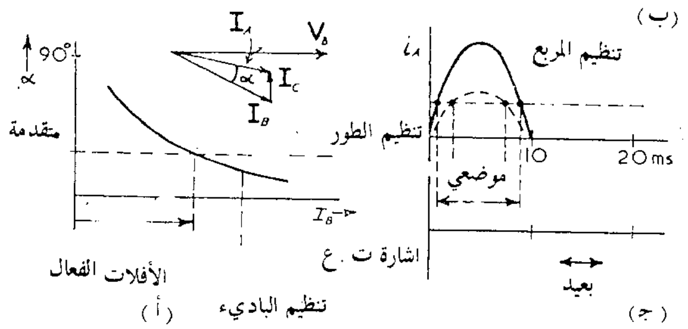
المـذبـذب : *Oscillator*

يتم تجهيز المذبذب العالي الأستقرارية بالطاقة بصورة دائمية ولكنة يوصل بدائرة المضمن فقط اذا ماتم اشتغال المرحل البادىء الواطىء التنظيم (أوفي حالة ارسال اشارة فحص) . ويتم اختيار التردد لأعطاء أقل تداخل مع المنظومات الحاملة المجاورة : وتخصص الترددات الواطئة الى الخطوط الأطول وذلك لتقليل تضاؤل الأشارة . يكون أقل تردد حامل محدوداً ذلك لأن متسعة الاقتران C_2 تصبح كبيرة جداً ومكلفة . أما أعلى تردد حامل فيكون محدوداً أيضاً بسبب التضاؤل في الأشارة على طول الخـط . ان التضاؤل يزداد بازدياد التردد وطول الخط وسمك الجليد على الموصلات .

المضمـــن : Modulator

من الناحية الفعلية يكون المضمن عبارة عن أقليد غلق–فتح (تعديل 100%) . ويتم ارسال الموجه الحاملة عندما يكون خرج المرّبع موجباً لحظياً (في لحظة زمنية معينة) : (أنظر الشكل 1.14 (جـ)) .

المضخم المرســل : ويعطى هذا خرجاً بين 10 و 20 واط ولأسباب اقتصادية يكون المضخم المرسل من النوع ذي الأمرار النطاقي العريض القياسي . ويغطي المدى الكلي للترددات الحاملة ويحتوي على مرشح دخل امرار نطاقي ضيق منغم الى تردد المذبذب .



الشكل 1.14 مقارنة – طور توضح :

(أ) تأثير تيار الشحن على زاوية الطور .

(ب) تأثير تنظيم المحدد على أمد بقاء النبضة .

(ج) أمد بقاء النبضة لعطل خارجي .

جهـــاز اقتران الخط :

(أنظر الشكل 1.13) . ان المتسعة C_2 (2000 بيكوفاراد) هي عبارة عن عدد من المتسعات متوالية الربط ومقننة عند فولتية خط – محايد للمنظومة وتكون ضمن عازل ضغط عالي . مفاعلة هذه المتسعة عالية عند تردد القدرة وواطئة عند تردد الموجة الحاملة وهـذه الأخيرة تقلل الى الصفر بوساطة محاثة L_2, ومتسعة C_2 منغمةعلى التوالي الى تردد الموجة الحاملة . أما L_3 (100 ميكروهنري) وC_3 فهي مصيدة الخط (مصيدة الموجة) وتكون موضوعة اعتيادياً في قمة عازل الضغط العالي ومنغمة الى تردد الموجة الحاملة بحيث ان الأشارة الحاملة توجه نحو المنطقة المحمية . ويقنن L_3 بحيث يحمل تيار الحمل بصورة مستمرة ويصمم ميكانيكياً ليصمد ضد التيار الأقصى للعطل . ومن الممكـــن استخدام طور واحد فقط . مع سلك العودة الأرضي . ولكن المعتاد عملياً والثابت في المملكة المتحدة هو استخدام طورين أثنين . ان هذا يقلل الأشعاع من الخط وبذلك يقلل من تضاؤل الأشارة و لكنه يضاعف تقريباً كلفة جهاز الأقتران . أما L_1 و C_1 فتنغم الى التردد الحامل وتكون فعلياً مقصورة الدائرة عند تردد القدرة , لذا فهي تقلل الى الحد الأدنى أية تغذية داخلية من منظومة القدرة الى معدات التردد العالي . وللسبب نفسه يجهز المحول بعازل حجب وشبكة ترشيح مؤرضة . وتعطي المحولات ممانعة توفيق

لعناصر الأقتران وذلك لتقليل أنعكاس الأشارة الى الحد الأدنى . وتعد معدات الأقتران بوصفها وحدة متكاملة . وتكون مكافئة لمرشح امرار نطاقي عريض (يستطيع تغطية حماية التردد الحامل وكذلك الأتصالات) يغذي الممانعة المميزة للخط .

أما اذا اريد استخدام جهاز الأقتران لغرض الأتصالات ونقل البيانات (كما هو معتاد لأسباب اقتصادية) . فعند ذلك يستفاد من الملف الثالثي على المحول T_2 (هو محول هجيني) . ويوضح الشكل 1.13 أيضاً وعلى اليمين . كيف يمكن ان تجزأ المتسعة C_2 الى C_{21} و C_{22} بحيث أنها تعمل بوصفها مجزء فولتية وهذه بدورها تؤلف مع محول الفولتية .,V.T الملفوف محول فولتية متسعي ((C.V.T.)) . ان استخدام جهاز الأقتران لأغراض الحماية والاتصال وكذلك في قياس الفولتية يقلل من تكاليف الأجهزة المستخدمة في مثل هذه الأمور .

المضخـم المستلـم : ويكون هذا مضخماً ذا نطاق عريض يغطي مدى الترددات الحاملة . ويشتمل على مرشح دخول بامرار نطاقي ضيق منغم الى تردد الحمايـة الحاملـة المستخدمـة : ويجب ان يرفض اشارات الاتصـالات . فمثـلاً لـخـرج مضخم مرسل مقداره 10 واط وتضاؤل ارسال كلي قدره dB, 30 . يكون دخل المستلم في هذه الحالة 10 ملي واط . ويقلل محدد دخول الأشارات المحلية والبعيدة الى الأتساع نفسه .

ويجب ان يكون المستلم غير حساس الى التداخل (الضوضاء الراديوية) من أقواس الشرارة الحادثة في فواصل قطع الحمل ، وقواطع الدورة وكذلك الاعطـال ، وكذلك من الضجيج من الخطوط ذاتها ، حيث ان مثل هذا التداخل قد يؤخر الأفلات لعطل داخلي .

كاشـف الطـور (مزيـل التضميـن) :

ان المضمن يعطي خرج فولتية مربعة الموجة عندما يكون الدخل ذا تردد عال ، ويغذي دائرة تكامل R, C متبوعاً بكاشف مستوى (مرخل قياس فولتية) عبر المتسعة ، وتكون مكونات الدائرة مرتبة بحيث أنه اذا غذيت اشارة ت . ع الى المستلم تتفرغ المتسعة من شحنتها ، وخلافاً لذلك فأنها تشحن . أما زمن توصيل اشارة ت . ع فيجب أن يكون حوالي زمن دورة كاملة وذلك في الحالات العملية لمنظومة القدرة خلال عطل خارجي (الشكل 1.14 (جـ)) .

وخلال عطل داخلي تغذى الأشارات المحلية والبعيدة الى المستلم في نصف الدورة نفسه . بحيث ان شحن المتسعة يكون أكثر من تفريغها . وترتفع فولتية المتسعة (تتكامل) بشكل موجة من المنشار حتى تتجاوز تنظيم كاشف المستوى وذلك بعد مرور دورة أو دورتين.

بسبب تيار الخط الشاحن الكلي I_C ازاحة طورية بين I_A و I_B (انظر الشكل 1.14 (أ)) . وتكون هذه الأزاحة أكبر لتيارات الأحمال الخفيفة أو لتيارات الأعطال النافذة : أما القيمة النموذجية للسماح لهذا الفرق فقد تكون بحدود $10°$. وتتعرض منظومة الحماية للأفلات بسبب هذه التيارات الصغيرة في حالة عدم كبحها بوساطة تنظيم البادىء . أما زمن ارسال الأشارة لخط طوله 160 كم فيكون حوالي 0.5 ملي ثانية اوبازاحة طور حوالي $10°$. (وهذا الطول يمثل بالتقريب الحد الأعلى للحماية الحاملة) .

واذا سمح بازاحة طور حوالي $5°$ في المعدات وكذلك بحد أمان فسوف يكون التنظيم النموذجي $\pm$ ($30°$ الى $40°$) : في هذه الحالة قد تشتغل الحماية بسبب فرق طور يتجاوز التنظيم شريطة ان يكون مقدار تيار العطل بالقدر الكافي بحيث أنه يؤدي الى تشغيل المرحل البادىء ذا التنظيم العالي .

على الطالب ان يفكر ببديل اخر ممكن الى الشكل 1.14 (ج) . اي بعبارة اخرى يصمم دائرة بحيث لايتم ارسال اشارة ت .ع الا اذا كان المربع موجبا .

وللتأكد من ان جهاز الحماية الحاملة يعمل بصورة صحيحة . يتم ارسال اشارات فحص بصورة ذاتية كل نصف ساعة الى النهاية البعيدة وتستلم عند رجوعها الى النهاية الموقعية : وهذا الاسلوب لايفحص دائرة البادىء او دائرة الافلات . وبسبب وجود مرحلات البدء فان وجود اي عطل و لو طفيف قد يبطل اجراءات الفحص هذه . انظر الشكل 1.12.

البديل الاخر لارسال الموجة الحاملة على خط القدرة هو استخـــدام الاتصـــالات الراديوية في مدى الترددات العالية جداً v.h.f. او الاكبر منها ذلك لان هذه الترددات تكون اتجاهية بصورة كبيرة وارسالها يمكن ان يكون مستمرا وكذلك بسبب اتساعها لعدد كبير من القنوات . لذا يمكن استخدام هذه الترددات لغرض الحماية . والسيطرة . والاتصال ونقل البيانات . الا انها تكون محدودة لخطوط النقل بطول حوالي 60 كم الا اذا استخدمت معيدات (repeaters) باهضة التكاليف .

1.4 قواطع الدورة ذات اعادة الغلق الذاتي :

Auto-reclosing circuit breakers

1.4.1 منظومات القدرة الريفية : RURAL POWER SYSTEMS

تشتمل منظومة توزيع ريفية نموذجية على خط علوي معلق شعاعي (تغذية احادية) ذي 11 ك . ف بتفرعات خارجة مربوطة مع الخط على شكل T اوخطوط ناتئة (مهمازة) وتغطي هذه المنظومة مساحة كبيرة تكون معظمها بعيدة عن طرق المرور . وتكون الخطوط منبتة على اعمدة خشبية عازلة (المواصفات القياسية البريطانية B.S. 1320) بحيث يكون احتمال وقوع الاعطال الارضية بعيدا الا في حالة انقطاع الموصل وسقوطه على الارض . وفي منظومات الحماية القديمة . كانت توضع فواصم عند الدخول الى الخط الرئيسي وكذلك الدخول الى الخطوط الناتئة . مشكلة بذلك منظومة حماية متدرجة الزمن (انظر الجزء الاول . الفقرة 9.4) . المشكلة العملية التي برزت انذاك هي ان 90% من الاعطال تكون اعطالا عابرة نتيجة للشرر العرضي الناتج عن الصواعق وكذلك الاسلاك المقطعة التي يتم رميها عبر الاطوار . اي ان العطل غير موجود بعد اختفاء تأين الهواء : ولكن عملية استبدال المصهرات كانت غير رخيصة ومستهلكة للوقت . خاصة بعد هبوب عاصفة رعدية شديدة .

اما في الوقت الحاضر فقد اظهر انتاج قواطع دورة تعيد عملية الغلق ذاتيا (المغلقات الذاتية) لتزيد من امنية التجهيز وتقلل من الانقطاعات : سيتم التطرق الى موضوع قواطع الدورة في الفصل 2 . ان الغالق الذاتي عبارة عن قاطع دورة زيتي صغير ثلاثي الطور يوضع اسفل الخط وعلى العمود الخشب . ويمكن ان يبرمج ميكانيكيا ليعطي الى حد اربع عمليات افلات اما لحظية او متأخرة زمنيا اوكليهما . ليلائم منظومة القدرة . ويتم الحصول على الطاقة الضرورية لنوابض الفتح والغلق من خط القدرة نفسه بوساطة مغناطيس كهربائي مربوط على التوازي خلال نقاط تلامس ثانوية عبر مصدر التغذية . عندما يفتح الغالق الذاتي (يفلت) تصل الطاقة الى المغناطيس الكهربائي ويشحن منتجه نابض الغلق بصورة جزئية الى نقطة يفتح عندها المنتج نقاط التلامس الثانوية في دائرة المغناطيس الكهربائي . ويرجع المنتج الى وضعه الطبيعي وتتكرر العملية الى ان يتم شحن النابض بصورة تامة . وعند هذه النقطة يقوم النابض باغلاق الغالق الذاتي . هذا الفعل بدوره يفتح نقاط التلامس الثانوية .

اما حماية عطل الطور (التيار المفرط) فتتم بوساطة ثلاثة ملفات افلات مربوطة على التوالي تحمل تيارات الخط . ويقوم اي ملف من هذه الملفات بتزويد الطاقة اللازمة لتشغيل الغالق الذاتي (للاطوار الثلاثة) عندما يتجاوز تيار الخط قيمة التنظيم (اي حوالي ضعف التيار المقنن) . ويتم الحصول على التأخير الزمني في فعل الافلات (الاسقاط) باستخدام وعاء توهين زيتي . ويسيطر حجم الفتحة التي يتم من خلالها حقن الزيت على زمن التأخير . اما الافلات اللحظي فيحصل عليه بوساطة صمام امراركبير . ويتم ضبط التنظيمات الميكانيكية الضرورية مسبقا لتعطي سلسلة معينة من الافلاتات اللحظية او المتأخرة الى حد اربع مرات . ويتغير كلا النوعين من الافلات عكسيا مع تيار العطل حيث يقل زمن الافلات اللحظي من حوالي 0·3 ثانية الى 0·06 ثانية . اما زمن الافلات المتأخر الاقصى فيكون من 40 ثانية الى 0·7 ثانية للتيارات التي تتجاوز قيمتها ضعف اوعشرين مرة بقدر التيار المقنن على التوالي . اما ازمان الافلات المتأخر فيمكن تقليلها بزيادة حجم الفتحة في وعاء التوهين وذلك لموافقة خواص المصهر .

فيما يلي تتابع نموذجي لغالق ذاتي . او بعبارة اخرى لعمليتي افلات لحظيتين متبوعتين بعمليتي افلات متأخرتي الزمن . فعند حدوث العطل ينفلت الغالق الذاتي لحظيا ليقلل الاضرار المحتملة نتيجة لتيار العطل ويبقى بعدها مفتوحا بفترة زمنية كافية – الزمن الميت اوزمن الفتح – بحيث تتوقف فيها عملية التأين في القوس الكهربائي الناجم عن العطل . وقد يتغير الزمن الميت اعتمادا على نوعية الحمل . خذ مثلا على ذلك المحركات الكهربائية . لكن هذا الزمن يكون بصورة عامة ثانية واحدة . عند ذلك يتم اعادة غلق الغالق الذاتي . واذا كان العطل من النوع العابر فيجب اعادة تجهيز الطاقة الان الى جميع المستهلكين . وخلافاً لذلك فان الغالق الذاتي يفلت مرة ثانية وبصورة لحظية . وينتظر ثانية واحدة أخرى . يعيد بعدها عملية الاغلاق . ان اكثرية الاعطال العابرة يتم ازالتها في الانفلات الاول . بينما يتم ازالة البقية الباقية في الانفلات الثاني . وعلى اية حال اذا كان العطل من النوع الدائم فان الانفلات الثالث يكون متأخراً زمنياً بفترة كافية لصهر مصهر الخط الناتيء والذي يكون من النوع البطيء الانصهار ويحمل تيار العطل . واذا كانت عملية اعادة الغلق ناجحة بحيث يبقى الغالق الذاتي مغلوقاً فان التجهيز يعود الى جميع المستهلكين عدا الكائنين خلف المصهر . ويتيح الافلات الثاني المتأخر عملية ازالة الاعطال الدائمية المستعصية عند المصهر . واذا لم تكن ازالة العطل قد تمت بعد فعندئذ يكمل الغالق الذاتي تتابعه . بافلات ثان متأخر ويمسك بعدها (يبقى مفتوحا) . في هذه الحالة يجب التدخل واعادة الوضع الميكانيكي بطريقة يدوية . واذا تمت ازالة

العطل قبل الامساك فان العملية الميكانيكية تعيد اوضاعها ذاتيا وحينئذ يمكن تكـــرار التتابع الـكامل مرة اخرى . الا اذا حدث عطل آخر قبل ان تعاد الاوضاع الى طبيعتها بصورة تامة .

تتم عملية حماية عطل الارض بوساطة ثلاث محولات تيار مربوطة بصورة استبقائية (اي على التوازي) في جلبات عوازل الغالق الذاتي (انظر الجزء الاول . الفقرة 9:5) . ويكون التنظيم حوالي 20 أمبيرا . وتكون جميع عمليات الافلات لحظية الى ان يمسك الغالق الذاتي . (ان اخطر حالة تحدث لعطل الارض عندما ينقطع موصل ويقع عـلى ارض جافة او اسيجة أو حواجز . . الخ . حيث ان تيار العطل قد يكون اقل من 20 أمبير فتعد تقريبا حالة غير ممكنة الحماية) .

اما المقسمات الذاتية فهي مقاليد (مفاتيح) زيتية ثلاثية الطور قاطعة للحمل معالجة للعطل تيسرت في الوقت الحاضر بديلا من مصاهر الخطوط الناتئة. ان المقسمات تغلق يدويا وتفتح بوساطة النابض . اما نبضات تيار العطل فيتم عدها واستكمالها بوساطة وعاء التوهين الزيتي الذي تعمل غاطساته بمغناطيس كهربائي يأخذ طاقته من تيار الخط . ويرتب عملية الافلات آليا بحيث تحدث معه نبضة أو نبضتين أو ثلاث نبضات . ولـكن زمنه يكون مسيطرا عليه بحيث يتم فتح المقسم خلال الزمن الميت للغالق الذاتي فقط . اما حماية عطل الارض فيحصل عليها باستخدام محولات تيار مربو طة على التوازي تغذي مرحلا لعد النبضات افرض انه تم تنظيم الغالق الذاتي لثلاث عمليات افلات لحظية متبوعة بانفلات واحد متأخر الزمن . وان المقسم منظم لينفلت بعد ثلاث نبضات من تيار العطل . ففي هذه الحالة يجب ازالة الاعطال العابرة . وبصورة نهائية . خلال الزمن الميت الثاني . وبما ان المقسم لم يكمل سلسلته المتضمنة عد ثلاث نبضات . فسوف يعيد عداده الـى وضعه الطبيعي ضمن دقائق قليلة . وللاعطال الباقية . سوف يكمل المقسم سلسلته في عد النبضات الثلاث . وينفلت خلال الزمن الميت الثالث للغالق الذاتي . ويمسك بعدهـا . ويمكن ان تتم عملية التمييز للحماية بين مقسمين اثنين وذلك بتنظيم المقسم البعيد ليعد نبضتين اما المقسم القريب من المصدر فينظم على عد ثلاث نبضات . ويجب ان تميـــز المقسمات (او المصاهر) وكذلك الغوالق الذاتية فيما بينها ومع منظومة الحماية المتدرجة الزمن (الجزء الاول . الفقرة 9.4.2) على جهة 11 ك . ف لمحطة ثانوية 33/11 ك . ف تغذي الخطوط الريفية :

ان النبضات الحادثة في التيار تعقد من عملية الحسابات ذاتها .

1.4.2 خطوط النقل الرئيسية (الشبكة الكبرى) :

MAIN TRANSMISSION LINES (GRID)

ان مبدأ قاطع الدورة الذاتي يمكن ان يطبق على خطوط الشبكة الكبرى وقد كان النوع القديم يدعى بالغالق الذاتي ذي السرعة العالية وذلك لان زمنه الميت كان اقل من ثانية واحدة . وفي أغلب الحالات تم ابدال تلك الغوالق بغوالق ذاتية بطيئة السرعة او غوالق ذاتية مؤخرة بسبب المشاكل الناجمة عن النوع ذي السرعة العالية .

ان مستوى العطل على الشبكة الكبرى يكون من الكبر بحيث ان الاضرار التي يسببها تكون عظيمة حتى ولو بنبضة واحدة من تيار العطل . لذا فقد استخدمت (وتستخدم) اعادة غلق باطلاقة واحدة في تلك الاونة . واذا تم فتح شبكة كبرى محملة . فأن منطقة نهاية الارسال يصبح لديها فائض من القدرة لذلك فأنها تتسارع . بينما يحدث تباطؤ في منطقة نهاية الاستلام (انظر الفصل 3) . وبذلك تزداد زاوية الطور بين فولتية نهاية الارسال وفولتية نهاية الاستلام . وقد ينتج تمور تيار اذا ما تم اقفال قاطع الدورة . اما الزمن الاقصى الذي يمكن ان يبقى فيه خط الشبكة الكبرى مفتوحا (زمن اعادة ربط الدائرة) فيكون حوالي 0.5 ثانية . بينما يكون الزمن الادنى للتخلص الايوني لقوس العطل (الزمن الميت) حوالي 0.3 ثانية . ان الغوالق الذاتية يمكن استخدامها فقط مع الحماية الوحدية ذات السرعة العالية (متضمنة المسافة المعجلة) وذلك لان قواطع الدورة في كلتا نهايتي الشبكة الكبرى يجب ان تفتح بصورة لحظية . اما زمن التشغيل القياسي للحماية فيكون 3 دورات (60 ملي ثانية) وزمن قاطع الدورة الكلي يكون 6 دورات (0.12 ثانية) . اما قواطع الدورة ذات الزيت الجسيمة او ذات الدفع الهوائي فقد صممت خصيصا لتشغيل قطع – وصل – قطع سريع : اي ان تتابع الغلق يبدأ مباشرة اثر الشروع في تتابع الافلات وقبل انتهائه . لم يستمر استخدام الغالق الذاتي ذي السرعة العالية بصورة كبيرة وسبب ذلك هو انه اذا غلق على عطل دائم فأن تأرجح المنظومة خلال نبضتين من تيار العطل قد يسبب فقدان استقراريتها .

ولايسمح للغالق الذاتي المتأخر أو ذي السرعة الواطئة باعادة الغلق حتى يتم التأكد من بعض الامور . بسبب التواشجات . بحيث تتم عملية اعادة الغلق بأمان . ومن هذه الامور نذكر مثلا .

1 . النهاية المشحونة للخط الميت

أ) اذا لم تتم عملية تشغيل حماية قضبان التوزيع أو محول فولتية الخط V.T (كان العطل على الخط نفسه) .

(ب) يكون محول فولتية قضيب التوزيع (V.T.) مكهربا أما محول فولتية الخط (V.T.) فيكون ميتا (قاطع الدورة البعيد يكون مفتوحا) .

(ج) تستمر هذه الفحوصات لثوانٍ عديدة . فاذا لم يحدث هناك اي تبدل يذكر . اغلق قاطع الدورة .

في النهاية البعيدة من الخط يكون التأكد كما يلي

2 . فحص التزامن للنهاية المغلقة .

(أ) كما في أ من 1 أعلاه

(ب) قضيب التوزيع ومحولات الفولتية للخط V.T.s كلاهما يكون مكهربا .

(ج) فحص مرحل التزامن يشير الى ان الفولتيات على جهتي قاطع الدورة تكون ضمن حدود متفق عليها لفرق الطور (35° لثلاث ثوان) .

(د) كما في (ج) من 1 أعلاه .

(هـ) اذا لم يكن محول فولتية الخط V.T. مجهزا بالطاقة خلال زمن منظم مسبقا تكون الدائرة مشحونة من الخط الميت ومن هذه الجهة .

الأقلدة الذاتية : *Automatic switching*

عندما يحدث عطل على محول مربوط بشكل T على مغذ مجهز بغلق ذاتي متاخر . فان معدات الغلق الذاتي يتم ايقافها (باستخدام قناة الاقفالات البينية) الى ان يتم بصورة ذاتية فتح فاصل المحول الذي يحتوي على محرك . وبعدها تتم عملية الغلق كما مر في اعلاه . واذا فشل الفاصل في الفتح فان اشارة الاقفالات البينسي تعيد معدات الغلق الذاتي المتأخر الى حالتها الطبيعية وتمسك بذلك قواطع الدورة عن العمل .

1.5 محولات التيار : الأشتغال في الحالة العابرة :

Current Transformers: Transieat Operation

باكتشاف مرحلات الحماية الستاتيكية (الالـكترونية) وقواطع الدورة السريعه جداً (النوع المفرغ) . فقد امكن تقليل ازمان الحماية الـكلية وازمان قواطع الدورة الى حوالـي دورتين لـكل منهما منتجة بذلك زمن ازالةعطل بحوالـي 4 دورات او 80 ملي ثانية . لذلك فان تصرف محول التيار خلال الدورات القليلة الاولـى من العطل . وعندما يحمل المركبة العابرة لتيار العطل . يجعل الاهتمام به عالـي الاهمية (كذلك اصبح التصرف لمحول الفولتيةV.T. مهما عندما يربط الى مرحل مسافـي سريع جداً والذي يجب عليه ان يجد ممانعة العطل خلال الدورات القليلة الاولـى من وقت حدوث العطل) .

واذا حدث قصر دورة على منظومة قدرة (متمثلة بدائرة R, L توالٍ) فان شكل موجة التيارسبق ان اعطـي في الجزء الاول . الشكـل 7.9 : حيث تحتوي هذه (بصورة عامة) علـى تيار متناوب a.c. مضمحـل متراكب علـى تيار مستمر d.c. مضمحـل . والاضمحلال في الاول يكون نتيجة الزيادة الحاصلة في مفاعلة المولد حين مرورها بمراحل دون العابرة . والعابرة والمفاعلة التزامنية . بينما يكون الاضمحلال فـي الاخيرة بسبب مقاومة منظومة القدرة . ان المولد هو الجزء الوحيد في منظومة القدرة الذي تتغير قيمة مفاعلتهمع الزمن . لذلك يكون هذا التاثير ملحوظا ومهما للاعطال القريبة من المولد . وسوف لايسمح له في هذا المضمار . فيما عدا استخدام القيمة العابرة مستقبلا .

يمكن اعادة كتابة معادلات تيار العطل في الفصل السابع الفقرة 7.4 والفقرة 7.5 وكالاتـي .

$$i_p = (E_{pm}/Z_p)[\sin(\omega t + \alpha - \phi_p) - \exp(-R_p t/L_p)\sin(\alpha - \phi_p)] \quad [1.16]$$

حيث يشير الرمز السفلـي p الى جهة الابتدائـي لمحول التيار C.T. . ان هذه المعادلة يمكن ان تكتب بمعاينة ما يلي : الحد الاول هو تيار الحالة المستقرة بينما الحد الثانـي هو التيار العابر – دالة اسية مضمحلة ومفردة . بما ان للدائرة عضو خازن للطاقة مفرد فقط – بحيث ان التيار $i_p = 0$ عندما $t = 0$. اما α فهو عامل يعتمد

على تلك اللحظة لموجة الفولتية التي يحدث فيها العطل . والتيار العابر سوف يكون باقصى قيمته عندما $\alpha-\phi_p = -\pi/2$ درجة نقطرية ولذلك تختصر المعادلة [*1.16*] الى

$$i_p = I_{pm}[-\cos \omega t+\exp (-R_pt/L_p)] \qquad [1.17]$$

حيث $I_{pm} = E_{pm}/Z_p$. بصورة عامة ، وبارتفاع فولتية المنظومة المقننة فان $\phi_p \to \pi/2$ درجة نقطرية (او $90°$) وكذلك $\alpha \to 0$. وعندما تكون ϕ_p مساوية لـ $\pi/2$ درجة نقطرية ، فانعطلاً ما عند فولتية تساوي صفراً يؤدي الى حدوث حالة عدم تماثل قصوى لتيار العطل (مضاعفة التيار) .

ان الدائرة المكافئة (النموذج) لمحول تيارقد بينت في الجزء الاول ، الشكل 9.1 (أ) . وبادخال قيم نموذجية فانه من الممكن أن يبينَّ ان ادخال محول التيار ليس له تأثير على التحليلات الواردة في اعلاه : مثلاً خذ اسوأ حالة حينما تكون Z_p أدنى ما يمكن و Z_s، أقصى ما يمكن حيث يشير الرمز السفلي s الى جهة الثانوي لمحول التيار . عندئذ يمكن الحصول على مستويات عطل نموذجية عملية من المواصفات القياسية البريطانية B.S. 116 على قواطع الدورة فمثلا 250 MVA عند 11 ك . ف تعطي $Z_p \simeq 0{\cdot}5$ أوم . اما محول التيار النموذجي لـ11ك . ف فيكون 400/5 أمبير مع عبء (حمل) مقنن مقداره 15 VA عند التيار المقنن ، عليه تكون $Z_s = 0{\cdot}6$ أوم . ومكافئتها الثانوية (Z_p') تكون $Z_p' = 0{\cdot}5(400/5)^2 = 3200\,\Omega \gg 0{\cdot}6$ اوم . والعلامة ( ) تشير الى ان القيمة محولة الى الجانب الاخر من محول التيار . وعلى الطالب ان يعيد هذه الحسابات باستخدام محول تيار 15 VA ، 400/1 أمبير .

ان التحليلات التامة للحالة العابرة لمحولات التيار صعبة ، لذلك وللحالات الحاضرة سوف تطرح بعض الفرضيات لتسهيل هذه التحليلات . سوف يفترض ان العبء (المرحل) له مقاومة بحتة ومن الممكن القول ان هذه احدى أسوء الحالات التي يمكن ان تحدث . ان منظومات الحماية تستخدم عادة محولات تيار حلقية – القلب قضيبية الابتدائي لها ملف ثانوي منتظم ويغطي معظم محيطها الخارجي اي من النوع ذي المفاعلة التسربية الواطئة (انظر الجزء الاول ، الفقرة 9.4.4) : لذلك سوف تهمل المفاعلة التسربية للثانوي . سوف يفرض ان عبء محول التيار هو مقاومة بحتة ، يجمع اليها مقاومة الاسلاك الرابطة بين محول التيار وعبئه (المرحل)

، تم تجمع مع مقاومة فقد الحديد لدائرة اثارة محول التيار كي تعطي مقاومة كلية R_s، تحمل تياراً ثانوياً i_s ومحاثة الاثارة المربوطة على التوازي هي L_e، تأخذ تياراً مقداره i_e. ان دائرة الثانوي الان تشتمل على دائرة R_s, L_e توازٍ اما داخلها فيكون تيار العطل الابتدائي منسوباً الى جهة الثانوي ، اي ان .

$$i'_p = i_p(N_p/N_s):$$

واجعل ايضا $$I'_{pm} = I_{pm}(N_p/N_s)$$

اما عناصر الدائرة الاخرى فانها سوف تفرض كونها ثابتة حتى يتسنى استخدام التحليلات الخطية : وبسبب التشبع في قلب محول التيار فان امكان تطبيق هذا الافتراض يكون بعيدا (خاصة اذا اشتملت R_s على مقاومة فقد الحديد) ولكن سوف يعطي تقريبا اوليا للحل الحقيقي . ولكي نخمن الفيض العابر في القلب ، سوف نهمل تيار المغنطة (اي ان $L_e \to \infty$) ، حينئذ يمكن القول ان هذه الحالة هي واحدة من اسوء الحالات ، وسوف تستخدم [1.17] ايضا ، اي حالة تيار الابتدائي العابر الاقصى .

تكون فولتية الثانوي $v_s = R_s i_s = N_s(\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t)$

وكمية الفيض القصوى في القلب $\Phi_m = (1/N_s)\int v_s \mathrm{d}t$

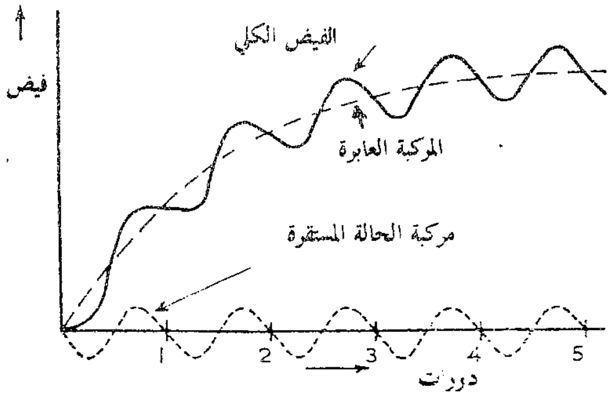
فلمركبة الحالة المستقرة للتيار i_s، وبأخذ التكامل على ربع – موجبة

$$\begin{aligned}\Phi_m &= -(1/N_s)\int_{t=0}^{\pi/2\omega} R_s I'_{pm}\cos\omega t\,\mathrm{d}t \\ &= -(R_s I'_{pm}/N_s\omega)\end{aligned} \qquad [\text{أ}1.18]$$

وللمركبة العابرة للتيار i_s ، وبأخذ التكامل من $t = 0$ الى $t \to \infty$

$$\begin{aligned}\Phi_m &= (1/N_s)R_s I'_{pm}\int_{t=0}^{\infty}\exp(-R_p t/L_p)\,\mathrm{d}t \\ &= (R_s I'_{pm}/N_s\omega)(\omega L_p/R_p)\end{aligned} \qquad [\text{ب}1.18]$$

لذلك فان مركبة الفيض الناتجة عن المركبة العابرة لتيار العطل تكون مساوية لتلك الناتجة عن مركبة الحالة المستقرة مضروبة بالعامل $\omega L_p/R_p$ حيث ان هذا العامل قد يكون من الكبر بحيث يصل الى 30 اذا ما اخذت الحالة الاسوء لعطل قريب من محطة توليد كبيرة ، وهذه القيمة تكون مناظرة لثابت زمن دائرة الابتدائي الذي مقداره



الشكل 1.15 فيوض قلب محول تيار خلال الفترة العابرة

$L_p/R_p \simeq 0{\cdot}1$ ثانية . اوحوالي خمس دورات . واذا فرض ان الفيضين يمكن جمعهما عدديا (الحالة الاسوء) يكون الفيض الكلي في القلب مساويا لمركبة الحالة المستقرة مضروبة بالعامل $1+(2\pi f L_p/R_p) = 1+2\pi T_p$

حيث T_p هو ثابت زمن دائرة الابتدائي بالدورات . واذا ما اريد تجنب التشبع في قلب محول التيار في منظومات لها قيم عالية لـ T_p . فان فيض الحالة المستقرة يجب ان يكون مهملا تقريبا . وسوف يحدد الفيض العابر بصورة رئيسية مساحة المقطع العرضي للقلب الحديد . ان شكل موجات الفيض قد رسمت في الشكل 1.15 ان اي فيض يتطلب تيار اثارة i_e . لذا فسوف يتم الان افتراض محاثة محدودة لدائرة الاثارة وهي L_e . اما التيارات الثلاثة في جهة الثانوي لمحول التيار فتكون العلاقة فيما بينها على النحو الاتي :

$$i'_p = i_e + i_s.$$
$$L_e(\mathrm{d}i_e/\mathrm{d}t) = R_s i_s = R_s(i'_p - i_e)$$
$$\mathrm{d}i_e/\mathrm{d}t + (R_s/L_e)i_e = (R_s/L_e)i'_p$$

حيث يمكن مكاملة هذه المعادلة . وبعد التعويض من [1.17] . ولحالة اقصى تيار ابتدائي عابر : يكون الحل

$$i_e = I'_{pm}R_s\left[\frac{-\cos(\omega t-\phi_s)+\{\exp(-R_s t/L_e)\}\cos\phi_s}{(R_s^2+\omega^2L_e^2)^{\frac{1}{2}}}\right.$$

$$+\frac{L_p\{\exp(-R_s t/L_e)-\exp(-R_p t/L_p)\}}{R_pL_e-R_sL_p}\Bigg] \quad [\text{أ}1.19]$$

$$=I'_{pm}\Bigg[\Bigg\{-\frac{R_s}{(R_s^2+\omega^2L_e^2)^{\frac{1}{2}}}\Bigg\}\{\cos(\omega t-\phi_s)-(\exp(-t/T_s))\cos\phi_s\}$$

$$+\Bigg\{\frac{T_p}{T_s-T_p}\Bigg\}\{\exp(-t/T_s)-\exp(-t/T_p)\}\Bigg] \quad [\text{ب}1.19]$$

حيث T هو ثابت زمن .

ويتغير العامل $Q=X_p/R_p,$ لاي منظومة قدرة خلال عطل مامن حوالي 30 لعطل قريب من محطة توليد كبيرة الى حوالي 10 لخط نقل في الشبكة الكبرى . وباخذ $Q=20$ متوسط قيمة ؛ $T_p=L_p/R_p=0{\cdot}064$ ثانية ، (قل 0·06 ثانية) . واذا اعطى فحص الدائرة المفتوحة على الثانوي لمحول تيار تقنيناته 15 V ، 1 امبير النتائج : $V=100$ فولت ، $I=150$ ملي امبير ، عامل قدرة p.f. = 0·71 متأخرا فتكون $L_e=3$ هنري وكذلك $\omega L_e=942$ اوم . واذا اخذت مقاومة دارة الاسلاك الرابطة 2 اوم ، عليه $R_s=16{\cdot}7$ اوم ، $\phi_s=89°$ ، $T_s=0{\cdot}18$ ثانية وكذلك $T_p/(T_s-T_p)=0{\cdot}5$ لذلك ففي [1.19] يمكن وضع $\cos\phi_s$ مساويا للصفر ، وتكون مركبة الحالة المستقرة للتيار i_e هي

$$i_e \simeq -\frac{I'_{pm}R_s\sin\omega t}{(R_s^2+\omega^2L_e^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\simeq -\frac{I'_{pm}R_s\sin\omega t}{\omega L_e} \quad [1.20]$$

وقيمة ذروته تكون حوالي $0{\cdot}0177\,I'_{pm}$.

والمركبة العابرة لتيار الاثارة تصل الى قيمتها القصوى عندما

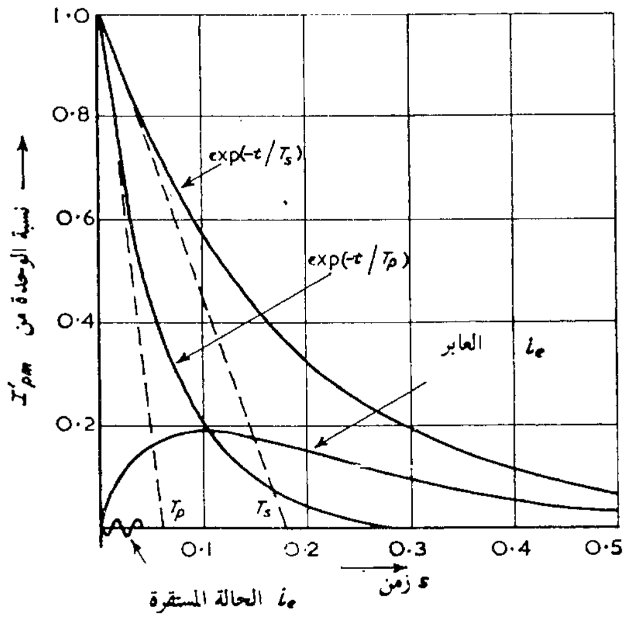
$$t=\frac{T_sT_p}{T_s-T_p}\ln\frac{T_s}{T_p} \quad [1.21]$$

وتكون قيمتها القصوى

$$I'_{pm}\exp(-t/T_s) \quad [1.22]$$

حيث t معطى بالمعادلة [1.21] . ويبين الشكل 1.16 تخطيطا للمركبات العابرة لتيار الاثارة . على الطالب ان يفكر في الحالة عندما $T_s=T_p$

ان تيار الثانوي يعطى بالمعادلة $i_s = i'_p - i_e$ ويمكن الحصول عليه بوساطة طرح [1.19] من [1.17] ، او بتوجيه ادق بحذف i_e من المعادلة التفاضلية في بداية التحليل المذكورة في اعلاه . اما شكل موجة الفيض فيمكن الحصول عليـــه



الشكل 1.16. التيارات العابرة في ثانوي محول تيار .

بمكاملة i_sR_s . ويجب مقارنته مع شكل موجة تيار الاثارة i_e . وللحصول على معلومات اخرى على التحليل العابر للدوائر الحاوية على محولات تيار . ينصح الطالب بمراجعة كتاب *Current Transformers* لمؤلفة Wright, A . ومقارنـــة التحليلات النظرية الواردة اعلاه مع فحوصات عملية يمكن تلخيصها كما يلي .

ان نمذجة فقد الحديد بسبب التيارات الدوامية يمكن ان تتم بصورة صحيحة بوساطة مقاومة توازٍ ثابتة . ولايكون الامر كذلك فيما يخص فقد التخلفية . وهذه المقاومة تتوازى مع عبء محول التيار لتقلل القيمة الفعالة للمقاومة R_s فتقلل كذلك من الفيض العابر .

اما فقد الحديد فيميل الى جعل ثابت الزمن **للثانوي قليلا** . ان اية مفاعلة في العبء وفي اسلاك التوصيل وكذلك ثانوي محول التيار **تكون مهملة اذا** ماقورنت مع محاثة التوازي لدائرة الاثارة L_e . لذلك يكون لها تاثير **قليل على** ثابت زمن الثانوي والفيض العابر .

وقد نوقش التأثير على تيار الثانوي في حالة حدوث التشبع في القلب الحديد للمحول في المرجع السالف الذكر .

المراجع

ANIL KUMAR, N. M. 1970. Composite instantaneous comparators: basis for design and their transient performance. *Proc. I.E.E.* **117**, 147–156.

ELECTRICITY COUNCIL (Ed.) 1969. *Power System Protection.* 3 vols. Macdonald.

GRAY, C. B. & MUSTAPHI, K. K. 1969. Transient response of networks employed in protective relaying. *Proc. I.E.E.* **116**, 1349–1355.

HAMILTON, F. L. & PATRICKSON, J. B. 1967. Application of transistor techniques to relays and protection for power systems. *Proc. I.E.E.* **114**, 213–227.

HOEL, H. *et al.* 1966. Composite polar characteristics of multizone systems of phase-comparison distance protection. *Proc. I.E.E.* **113**, 1631–1642.

HUMPAGE, W. D. & KANDIL, M. S. 1968. Discriminative performance of distance protection under fault operating conditions. *Proc. I.E.E.* **115**, 141–152.

HUMPAGE, W. D. & KANDIL, M. S. 1970. Measuring accuracy of distance protection with particular reference to earth-fault conditions on 400 kV looped-circuit interconnections. *Proc. I.E.E.* **117**, 431–438.

HUMPAGE, W. D. & KANDIL, M. S. 1970. Distance-protection performance under conditions of single-circuit working in double-circuit transmission lines. *Proc. I.E.E.* **117**, 766–770.

HUMPAGE, W. D. & LEWIS, D. W. 1967. Distance protection of teed feeders. *Proc. I.E.E.* **114**, 1483–1498.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS. 1968. Some present-day protection problems. *Colloquium digest.* No. 1968/19.

JACKSON, L. *et al.* 1968. Distance protection: optimum dynamic design of static relay comparators. *Proc. I.E.E.* **115**, 280–287.

KHINCHA, H. P. *et al.* 1970. Developments in amplitude-comparator techniques for distance relays. *Proc. I.E.E.* **117**, 1118–1124.

KHINCHA, H. P. *et al.* 1970. New possibilities in amplitude- and phase-comparison techniques for distance relays. *Proc. I.E.E.* [illegible]–2141.

MATHEWS, P. & NELLIST, B. D. 1963. Transients in distance protection. *Proc. I.E.E.* **110**, 407–418.

WARRINGTON, A. R. C. **Vol. 1.** 1968; **Vol. 2.** 1969. *Protection Relays.* Chapman & Hall.

WELLMAN, F. E. 1968. *The Protective Gear Handbook.* Pitman.

WHEELER, S. A. 1970. Influence of mutual coupling between parallel circuits on the setting of distance protection. *Proc. I.E.E.* **117**, 439–445.

WRIGHT, A. 1968. *Current Transformers.* Chapman & Hall.

مسائل :

1 محطة توليد عند A تحتوي على ستة مجاميع لمولد مع محول متماثلة . المولدات مقننة عند 11 ك . ف . 120 MW . 150 MVA وكذلك $X_1' = X_2 = 18\%$ (عند التقنين) . المحولات مقننة عند 11/132 ك . ف . 150 MVA . مربوطة بشكل مثلثي /نجمي مؤرض مباشرة مع تأريض نقاط الربط النجمية جميعا . وكذلك $X = 12\%$ (عند التقنين) . وطول الخط AB الذي فولتيته 132 ك . ف هو 96 كم ومفاعلته $X_1 = 0{\cdot}44$ اوم / طور – كم . افرض ان المنظومة تعمل في حالة اللاحمل وبفولتية مقننة واهمل مقاومة المنظومة وتتطلب المرحلات الممانعية الصرفة عند A 3% من الفولتية الأسمية قيمة دنيا لأشتغالها بصورة مرضية . لعطل ثلاثي الطور احسب اقل مسافة للعطل من المرحل لـكي يعمل المرحل بشكل مرضي في حالة اشتغال (أ) مجموعة واحدة . (ب) ستة مجموعات من المولد – المحول .

(L.P.) (الجواب : 1·54 كم . 0·413 كم)

2 . اذا اشتغلت المجموعات الست في محطة التوليد (انظر السؤال 1) عند A . وكان المرحل المسافي للمرحلة 1 عند A هو مرحل مسامحي (مستقطب) له زاوية مميزة مقدارها 90° ومنظم بصورة صحيحة ليصل الى 80% من الخط AB . ربطت الان محطة توليد صغيرة لها ممانعة مصدر 158·6 اوم / طور عند 132 ك . ف في نقطة انتصاف الخط AB . جد موقع العطل الثلاثي الطور الذي عنده سوف يبدأ اشتغال المرحل واحسب بعدها نقص الوصول للمرحل .

افرض ان ق . د . ك للمصدر تساوي جميعاً الفولتية المقننة وتكون جميعها في الطور نفسه .

(L.P.) (الجواب : 5·42%)

3 . نظم مرحل المرحلة 2 عند A (انظر السؤال 2) بصورة صحيحة ليصل الى 50% نحو الخط BC . الذي طوله 64 كم . وعندما لاتكون هناك تغذية داخلة في B . الان . اذا ربطت محطة توليد . مشابهة لتلك التي عند A . في النقطة B . واشتغلت المجموعات الاثنتي عشرة جميعها . فاحسب نقص الوصول للمرحل عند A لاتوجد تغذية داخلة في منتصف AB .

(L.P.) (الجواب : 22·3%)

4. في منظومة حماية مسامحية لعطل طور معوضة يجهز كل مرحل بالفرق بين فولتية طورين اثنين والفرق المناظر بين تياري الطورين ، ويعني هذا ان المرحل a يقيس ($\mathbf{V}_a-\mathbf{V}_b$) / ($\mathbf{I}_a-\mathbf{I}_b$) . أمـا ممانعـة المصـدر فتكـون مهملـة . بين انه لعطل طور – الى – طور بين الطورين b–c تكون الممانعات المقاسة بوساطة المرحلات a ، b ، c هي $2\mathbf{Z}_1\underline{/-60^\circ}$، $\mathbf{Z}_1$ وكذلك $2\mathbf{Z}_1\underline{/60^\circ}$ على التوالي حيث $\mathbf{Z}_1 = R_1+jX_1$ هي ممانعة التتابع الموجب للخط من المرحل الى العطل . واذا امكن الان اهمال مقاومة الخط فبين (أ) انه اذا كان كل مرحل له تنظيم X_1 وزاوية مميزة مقدارها 90°. فان المرحل b سوف يشتغل فقط وكذلك (ب) اذا كانت الزوايا المميزة للمرحلات هي 30° لكل منها وكان التنظيم بحيث ان اشتغال المرحل b يكون على الحافة . فان المرحل a يكون معرضاً للاشتغال ايضاً . (L.P)

5. خط AB له ممانعة كلية Z_L. ممانعات المصدر المغذي عند A و b كليهما تكون Z_G والقوى الدافعة الكهربائية فرض انها متساوية وفي الطور نفسه . لحماية الخط AB نصب مرحل مسافي عند A . فاذاحدث عطل ارض بمقاومة R على قضيب التوزيع B . فبين ان الممانعة المقاسة بوساطة المرحل ($\mathbf{V}_{an}/\mathbf{I}_a$) تعطى كما يلي

$$\mathbf{Z}_L+R(2+(\mathbf{Z}_L/\mathbf{Z}_G))$$

افرض ان كلتا نقطتي التفرع النجمي للمصدرين متورضة مباشرة وان كل المشروع له الممانعة نفسها لتتابعات التيار الثلاثة (الموجب والسالب والصفري) .
واذا كان المرحل هو مرحل مفاعلي منظم الى 80% من مفاعلة الخط الكلية وكذلك $\mathbf{Z}_L = 15\underline{/60^\circ}$ أوم و $\mathbf{Z}_G = 6\underline{/80^\circ}$ أوم . فبين ان المرحل سوف يفلت لـ $R \geqq 3{\cdot}04$ أوم . علق على هذه النتيجة .

(L.P.)

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفَصلُ الثَاني

الفولتيات المفرطة عند قصم الدوائر والأقلدة

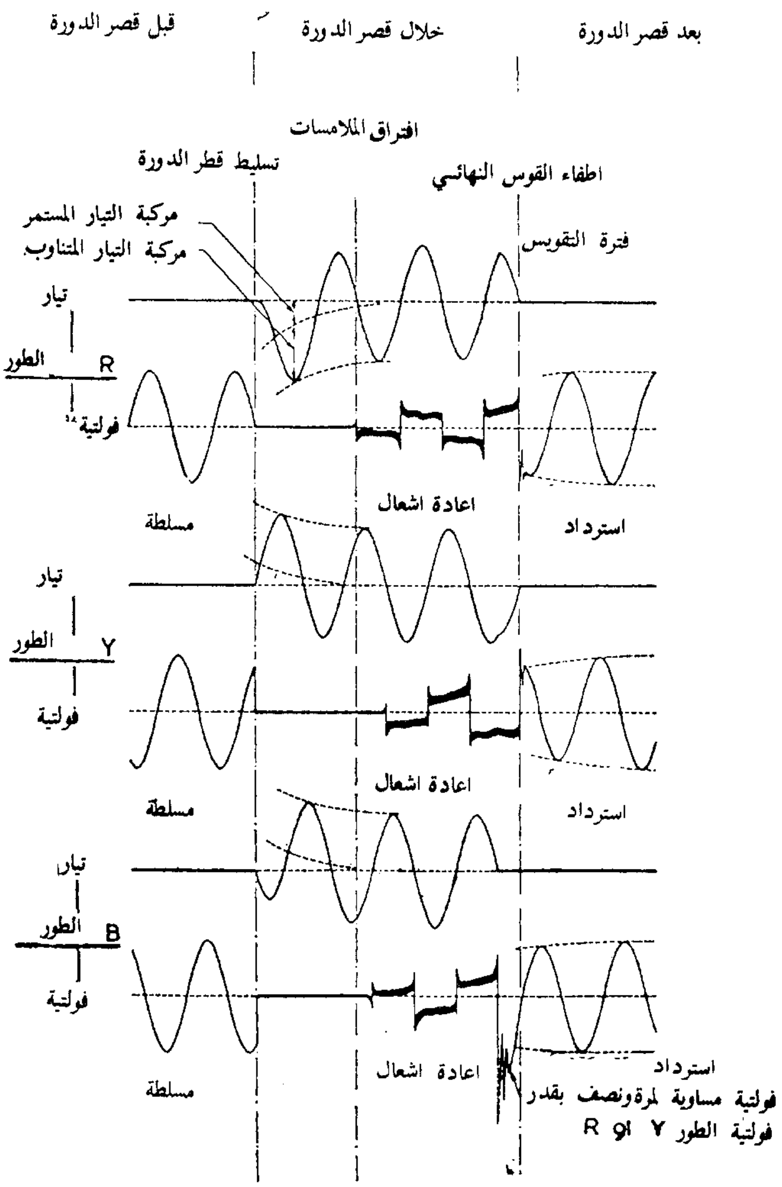
CIRCUIT INTERRUPTION AND SWITCHING OVER-VOLTAGES

2.1 مقدمة

الى جانب الاقلدة الطبيعية للحمل ، تكون قواطع الدورة في منظومات القدره لازمة لتعطي ازالة سريعة للعطل ، وذلك لتجنب اضرار التيار المفرط على المعدات وكذلك فقدان استقرارية المنظومة . وتستخلص اشارات العطل لافلات قواطع الدورة من منظومات الحماية (انظر الفصل 9 من الجزء الاول والفصل 1 من هذا الجزء من الكتاب) عن طريق مرحل افلات أخير مربوط الى ملف الافلات للقاطع .

عند تصنيع اي نوع من انواع قواطع الدورة يكون من الضروري التأكد من اشتغاله في محطة فحص لقصر الدائرة وانه (بين خواص اخرى) يزيل اعطال تيارات مختلفة بصورة مرضية . ان الشكل 2.1 (مأخوذ من المواصفات القياسية البريطانية B.S. 116) . يبين رسماً ذبذبياً لقاطع دورة زيتي مربوط الى مصدر ثلاثي الطور مع دائرة قصيرة ثلاثية الطور مسلطة فجأة على اطرافه . بعد هذه اللحظة مباشرة ، فان الملامسات المغلقة للاطوار الثلاثة للقاطع تحمل تيارات لها مركبات متناوبة متساوية ولكن مركباتها المستمرة d.c. تكون غير متساوية وكما موضحة في الشكل . وتسجل فولتيات قوس الشرارة في لحظة افتراق الملامسات للقاطع ، وعندما تنطفيء الاقواس تحتوي هذه على مركبات عابرة عالية التردد لايمكن ملاحظتها في الرسم الذبذبي ذي الفترة الطويلة بصورة صحيحة مثل تلك التي في الشكل 2.1 . ان الفولتيات العابرة هذه ستتم مناقشتها باسهاب خلال هذا الفصل ، اما الارتفاع الاضافي للفولتية الذي يحدث في الطور B في الشكل 2.1

نتيجة التيار في ذلك الطور والمقصوم قبل التيارات المارة في الاطوار الاخرى ، فستتم مناقشته في الفقرة 2.5 .



لشكل 2.1 رسم ذبذبي نموذجي لقصر دورة ثلاثي الطور (من B.S. 116)

ان من بين ازمان الاشتغال التي تكون مهمة في قطع الدورة هي زمن الازالة = زمن المرحل ومنظومة الحماية + زمن القصم للقاطع

زمن المرحل ومنظومة الحماية = الزمن من لحظة وقوع العطل الى لحظة غلق دائرة ملف الافلات للقاطع ؛

من القصم للقاطع = الزمن اللازم لصعود التيار في ملف الافلات الى القيمة التي عندها تعتق الملامسات + زمن فتح الملامسات + زمن التقويس الكهربائي .

للمرحلات الكهروميكانيكية ، يتغير زمن المرحل من حوالي 20 ملي ثانية الى حوالي ثانيتين في بعض الاجزاء من المنظومات الموجودة . وتستخدم في الوقت الحاضر مرحلات الكترونية ستاتيكية في منظومات القدرة . وهذه تستخدم عناصر انصاف الموصلات مثل الترانزستور والثايرستور بدلاً عن الاجزاء الكهروميكانيكية ، ويمكن لهذه المرحلات ان تشتغل بصورة سريعة جداً .

وعموماً يبلغ زمن التقويس حالياً من نصف الى نصفي دورة ، معتمداً على اللحظة في نصف دورة التيار التي عندها تنفصل ملامسات القاطع ولكن هناك بعض من قواطع الدورة الزيتية مازالت في الخدمة قد يستمر فيها القوس لعدة انصاف من الدورات عند بعض قيم العطل المقدرة بالـ MVA . أما انفتاح الملامسات فقد تحتل مابين حوالي دورة واحدة الى ثلاث دورات . لذا فمن الممكن في هذه الحالة ومع مرحلات سريعة وقواطع دورة حديثة تحقيق ازالة عطل خلال ثلاث دورات من تيار ذي تردد 50 هرتز ، ولكن الوقت يتغير بصورملموسة من منظومة الى اخرى وفي بعض الحالات في أجزاء مختلفـة لمنظومـــة واحـدة .

اذا كان العطل من شأنه ان يسبب أضراراً للاجهزة بحيث ان المصدر لايمكن ارجاعه في الحال فيقال عنه انه متواصل (باق) ، وعلى كل حال فان اكثرية الاعطال في منظومات القدرة مثل الصواعق والشرر العرضي لعوازل الخط العلوي المعلق او تراقص موصلات الخط وتقاربها من بعضها تحت ظروف الرياح والعواصف الثلجية القوية . كل هذه الاعطال تسبب قوساً كهربائياً في الهواء وتعتبر عابرة . وبعد قطع التيار في مثل هذه الاعطال ، يخمد تأين مسار القوس وبصورة سريعة ، ويمكن ان يعاد غلق الدائرة ذاتياً بعد فترة زمنية قصيرة ، لذا يكون زمن انقطاع المصدر من القصر بحيث انه لايؤثر على اكثرية الاحمال (اي ان الاضواء تخفت قليلاً فقط وتستمر المحركات في دورانها) .
ان زمن اعادة الغلق والذي هو الفترة من امداد الطاقة لملف الافلات والى عملية اعادة

الغلق التالية لملامسات قاطع الدورة . قد يكون من الصغر بحيث يعادل زمن اثنتي عشرة دورة في منظومات الفولتية العالية . ولكنه الان وبصورة عامة اطول بكثير (انظر الفقرة 1.4) . ويمكن ان ينظم قاطع الدورة بحيث انه اذا لم تتم ازالة العطل بالزمن الذي يتم فيه اعادة غلقه ، فربما يبقى مفتوحاً . اوقد يعاد اغلاقه للمرة الثانية اولمرات عديدة قبل ان يبقى مفتوحاً في نهاية الامر اذا كان العطل من النوع المتواصل (الباقي) . ان استعمال قواطع الدورة ذات الغلق الذاتي تمت مناقشتها في الفقـرة 1.4 .

2.2 تقنين قاطع الدورة Circuit breaker rating

يستطيع قاطع دورة ما ان يصل ويقطع تيارات بين 10 و 100 مرة بقدر التيار الطبيعي . والتيار الطبيعي هذا هو تيار الحمل الذي يستطيع حمله بصورة مستمرة . فمثلاً ان سعة القواطع الآن تصل الى 35 000 ميكافولت أمبير بينما تقنين المولدات قد عبر بصعوبة 500 ميكافولت أمبير فقط . ان سعة القطع بالميكافولت أمبير $=\sqrt{3}\times$ فولتية الخط المقننة (ك.ف) × أقصى تيار قطع مقنن (كيلو أمبير . ج.م.ت) . وتقنين تيار القطع هذا في بريطانيا هو قيمة ج.م.ت للمركبة المتناوبة فقط عند لحظة انفصال ملامسات القاطع . بينما في الولايات المتحدة يكون التقنين قيمة ج.م.ت لمركبتي التيار المتناوب والتيار المستمر في تلك اللحظة . (انظر الشكل 2.1) . لذا فانه لقاطع معين يكون التقنين الامريكي أعلى من التقنين البريطاني . ولقاطع دورة ثلاثي الطور الذي يقطع تيارا في دائرة محث . يجب ان تكون هناك مركبة تيار مستمر للتيار في الملامسات لطورين أو من المحتمل في الاطوار الثلاثة . لذلك سوف تعتمد قيمته في مرحلة القطع على اللحظة في الدورة التي يحدث عندها العطل . وعلى ثابت زمن الدائرة وسرعة القاطع . وتأخذ حساباً لهذه الامور الفحوصات الاختبارية للقاطع فمثلا ان المواصفات البريطانية B.S. 116 تتطلب اجتياز قواطع دورة زيتية لفحوصات لاتقل فيها مركبة التيار المستمر للتيار في لحظة انفصال الملامسات عن 50% من المركبة المتناوبة في احد الاطوار . وبالاسلوب نفسه وحين يغلق قاطع الدورة ينشأ تيار مستمر عابر . وربما تصل ذروة التيار في احد الأطوار الى 2.55× قيمة ج.م.ت للتيار المتماثل اذا كان عامل القدرة 0.15 أو أقل . والعامل 2.55 يكون 10% دون ذروة التيار النظرية وهي $2\sqrt{2}$ المعطاة بمركبة التيار المستمر المساوية لذروة المركبة المتناوبة . وذلك بسبب كون مركبة التيار المستمر انخفضت من قيمتها الابتدائية نتيجة للمفاقيد بالزمن نفسه الذي تصل فيه المركبة المتناوبة الى قيمة الذروة .

وتظهر بعض المناقشات حول مركبة التيار المستمر العابرة للتيار وكذلك التغير في المركبة المتناوبة للتيار المار عند حدوث عطل ما في منظومة قدرة وذلك في الفصل 7 من الجزء الأول .

2.3 اطفاء القوس وتجدد اتقاده Arc extinction and reignition

بابتعاد الملامسات المتحركة عن الملامسات الثابتة ينشأ قوسٌ كهربائيٌ بينهما . وفي أنواع معينة من اجهزة قطع الدائرة مثل المصهرات وقواطع الدورة للتيار المستمر (والتي لم يتم التطرق اليها هنا) يؤول التيار الى الصفر قسراً وبصورة مفاجئة (او يتم تقطيعه) . وفي قاطع الدورة للتيار المتناوب . يتجنب عملية تقطيع التيار بقدر الامكان حيث انها قد تؤدي الى تجاوزات للفولتية قاسية المفعول. ويصمم قاطع الدورة ليمنع تجدد اتقاد القوس عند نقطة الصفر الاولى او التالية المبكرة المحتملة للتيار ذو تردد القدرة وبعد ان تكون الملامسات قد افترقت وسببت نشوء القوس للمرة الاولى .

ويمتلك القوس منطقتي هبوط أنودية وكاثودية قريبة جداً الى الملامسات (التلامس) وتنبعث الكترونات من الكاثود غير العاكس (بعملية ميكانيكية لم يتم فهمها تماماً لحد الآن) . حاصلة على طاقة كافية ضمن المجال الكهربائي العالي جداً (والذي قد يكون بحدود 10^7 ف/سم) في منطقة هبوط الكاثود . ليؤين ذرات البخار والغاز المتعادل او المتهيج في نهاية تلك المنطقة . ان مناطق الهبوط هذه ومناطق الانتقال المجاورة لها ستكون مربوطة بعمود له مجال كهربائي واطيء نسبياً في داخله يكون كافياً ليعمل جيداً على مفاقيد الجسيمات المشحونة والحرارة المنبعثة منها . وتصاعد فولتية عمود القوس يزداد من حوالي 10 ف/سم لقوس غير مقيد الى اكثر من 100 ف/سم لقوس معرض الى حمل وتوصيل قاسيين . كما يحدث نتيجة التدفق فوق الصوتي لغاز في نضّاخ (بخاخ) لقاطع الدورة ذي الدفع الغازي أما الظروف في قاطع دورة زيتي فتكون مشابه الى حد مّا لما سلف لأن درجات الحرارة العالية للقوس تبخر الزيت بسرعة . واطفاء القوس يتم في غازات مثل غاز الميثان . والاستلين وكذلك الهايدروجين . بأستثناء التقنيات الصغيرة جداً يكون لهذه القواطع حجرة تقويس تصمم بشكل خاص بحيث ينتج دفع غازي له ضغط عال حول القوس . ونتيجة لمعدل الحمل الحراري العالي عند محيط القوس . يصبح القوس اكثر ضيقاً . بحيث انه مع كون درجة حرارة القلب تزداد بصورة كبيرة (لحد حوالي 50 000 كلفن) . يقل حجم المنطقة ذات التوصيل الكهربائي العالي . وبذا يزداد تصاعد فولتية العمود بحوالي مقداره المعين .

ويتحقق القطع الجيد عندما يكون التيار له قيمة الصفر الطبيعية (في تردد – القدرة) اذا تمت ازالة الالكترونات والايونات الموجبة من الغاز في الفجوة التي بين نقاط التلامس بصورة سريعة وكافية ، بحيث ان فولتية الدائرة التي تظهر حينها بين الملامسات تكون غير قادرة على تجديد اتقاد القوس ، وهذا يعني ان عملية ازالة التأين يجب ان تتم بسرعة . ويتحقق هذا بما يلي : (أ) اعادة التوحيد الحجمي للايونات الموجبة والالكترونات في المناطق التي تم انخفاض درجة حرارتها بوَساطة التوصيل الحراري نتيجة الدفع الغازي ، وفي بعض الحالات بوساطة التوصيل الحراري عندمايجبر القوس على ملامسة سطوح مبردة ، (ب) بالانتشار والطرد بوساطة حركة غاز جسيماته مؤينة وله ضغط عالٍ واخراجه من الفجوة التي بين نقاط التوصيل في قاطع الدورة . لذلك يستخدم الدفع الغازي بصورة عامة لخفض درجات الحرارة الكبيرة في غالبية المنطقة التي بين الملامسات ، الا في مركز قلب القوس ، وجرف الجسيمات المتأينة خارج الفجوة . وفي بعض الحالات لاطالة القوس وحمله بمواجهة سطوح مبردة . وفي بعض الاحيان تستخدم قوى مغناطيسية لغرض دفع وسوق القوس خلال الغاز نفسه .

ان العمليات والظروف الحرجة التي تحدث ضمن برهة صغيرة من الزمن (بضع اجزاء الملايين من الثانية) حول القيمة الصفرية للتيار حيث قد يتم منع تجدد الاشتعال وقد لايتم ، هي من الامور غير المفهومة تماماً لحد الآن . ان تصميم قواطع الدورة لايماثل تصميم معظم الاجهزة الاخرى في المنظومة ، حيث ان قواطع الدورة ليست سهلة الانقياد للحسابات التفصيلية ، وربما نستطيع القول ان عملية التصميم حرفة اكثر مما هي علم . ومن الضروري اجراء فحوصات اختبارية على القواطع في ظروف تكون اقرب مايمكن الى تلك التي تواجهها في الخدمة العملية .

لقد كان المفهوم سابقاً ان تجدد اتقاد القوس يحدث دائماً بانهيار شرري في الغاز ، وانه كان هناك «تسابق» بين استرجاع المتانة الكهربائية للغازات ، وفولتية اعادة الاشعال التي تظهر بين الملامسات . وحقيقةً ان تجدد الاشعال الحادث بعد اكثر من بضع مئات من الميكروثانية لقيمة الصفر للتيار ، وبسبب الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال ذات التردد الطبيعي الواطئة نسبياً ، يكون من النوع ذي الانهيار الشرري وان معدل ارتفاع فولتية اعادة الاشعال (او الاستفاقة) (r.r.r.v.) هو مَعْلَمْ مهم في تثمين خطورة فحص او عطل ما في حالات الخدمة . ان الانهيار الشرري هو تأثير المجال

الكهربائي الناتج عن تسليط فولتية عالية على فجوة لاتحتوي بصورة مبدئية على شحنات كهربائية حرة . وبعد القيمة الصفرية للتيار تكون درجة الحرارة أعلى وكثافة الغاز أوطأ من الظروف المحيطة ، لهذا السبب قـد يحـدث انهيار شـراري لفجـوة نقاط التوصيـل (الملامسات) بأقل من فولتية الصمد الطبيعية لها . ولأجل وقوع هذا النوع من تجدد الاشتعال يجب ان تعاد الفجوة اولاً من حالة قوس عالي التوصيل الى حالة عازلـة . وخلال الفترة المبكرة مابعد القوس او ما بعد الصفر ، يمتلك الغاز في الفجوة في الحقيقة مقاومة محدودة ومتغيرة ، ولذلك يمكن لفولتية اعادة الاشعال ان تنتج تيار مابعد الصفر متذبذباً . والذي قد يكون عالياً بحيث يصل الى 20 أمبير في بعض الانواع من القواطع . وقد يستمر هذا التيار من 5 الى 100 ميكروثانية ، وبذلك تجهز طاقة لابأس بها الى الغاز . ان هذه قد تسبب حدوث تجدد اشعال حراري خلال الميكروثواني العشر الاولى بعد القيمة الصفرية للتيار . لذا فان هناك توازناً في الطاقة يجب أخذه بنظر الاعتبار لمنطقة عمود القوس . والطاقة الكلية في وحدة الحجم هي $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ ، حيث ان ε_1 هي الطاقة الداخلية (حرارية ، تأين ، تهيج ، إنحلال ، ...الخ) . أما ε_2 فهي الطاقة الحركية الموجهة نتيجة للمجال الكهربائي . وكل وحدة حجم لها قدرة كهربائية داخلية p تعطى بضرب كثافة تيار مابعد الصفر مع تدريج فولتية منطقة العمود ، وفقد القدرة p_L والذي يشمل الحمل (فقد الطاقة الحركية) ، والتوصيل ، والاشعاع والمحتوى الحراري . معادلة الطاقة العابرة تكون على هذا الاساس $\partial\varepsilon/\partial t = p - p_L$ ، بحيث انه اذا اريد تجنب تجدد الاشعال الحراري فيجب ان تبقى p صغيرةً ، وهذا يعني ان الفولتية عبر الفجوة يجب تخفيضها الى اقل مايمكن ، ويجب زيادة p_L بالطرق التي تمت الاشـارة اليهـا آنفـاً .

على هذا الاساس يعتمد تجدد اشعال قوس ، سواءً بوساطة عملية الانهيار الشراري او الحرارة بصورة كبيرة على الفولتية بين نقاط التوصيل ، وهذه لها مركبتان همـا :

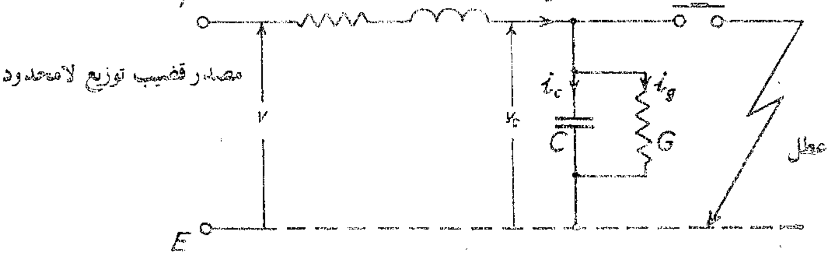
(1) فولتية استرداد لها تردد قدرة ؛
(2) فولتية اعادة اشعال عابرة لها تردد طبيعي واحد أو أكثر تضمحل أسياً حول فولتية الاسترداد . وهناك حركة قوية لاستخدام تعبير « فولتية الاسترداد العابرة » لهذه المركبة ، ولـكن بما ان معظم المواصفات الحاضرة تستخدم « فولتية اعادة الاشعال » فان التعبير الاخير استخدم ايضاً في هذا الكتاب .

ويعتمد عبور فولتية اعادة الاشعال على قاطع الدورة وكذلك على الدائرة ، بسبب الموصلية المحدودة مابين الملامسات وتيار مابعد الصفر . بحيث ان عبور الفولتية والتخلص الايوني في الفجوة لاتكون مستقلة بعضها عن بعض ، انه من الافراط الكبير في التبسيط اذا عددنا عملية قطع الدورة سباقاً بين الفولتية المتزايدة واسترجاع خاصية العزل للفجوة . وكذلك ان نعد معدل ارتفاع فولتية اعادة الاشعال مقياساً تاماً لـ « خطورة الدائرة » . ان معيار « خطورة الدائرة » قد يحتاج الى الاخذ بحسابات عوامل كثيرة منها مثلا الوضعية من موقع قاطع الدورة . الذي يهبط عندها الـ (r.r.r.v.) بزيادة النسبة المئوية لـ MVA, المقننة . وفي كل موقع سوف يختلف هذا المنحنى . ويجب ان يشمل هذا المنحنى حالات خاصة من الاعطال مثل عطل الخط القصير الذي سيتم التطرق اليه لاحقاً في هذا الفصل .

2.4 عطل متوازن ثلاثي – الطور على اطراف قاطع الدورة فولتية الاسترداد العابرة

Balanced 3-phase fault at the circuit breaker terminals transient recovery voltage

اذا كان العطل متوازناً ثلاثي الطور الى الارض عندئذ نحتاج الى طور واحد عموما لاغراض الدراسة ، مع انه في الحقيقة لايمكن اهمال ردود فعل الاطوار فيما بينها دائما خلال ظاهرة الأقلدة (switching) . يبين الشكل 2.2 الظروف المباشرة بعد القيمة الصفرية للتيار في ملامسات القاطع في طور واحد . حيث تم تأشير طرف الخط الاصفر بالحرف Y والأرض بالحرف E. وقد بين عطل يحدث عند اطراف القاطع أو قربه .



الشكل 2.2 طور واحد من دائرة بعطل ثلاثي الطور عند قاطع الدورة أو قربه .

اما G فتتضمن بصورة رئيسية موصلية مابعد الصفر في دائرة قاطع الدورة سوية مع اي موصلية تواز في الدائرة .

وندرج في ادناه الافتراضات التي تم التوصل اليها : —

(أ) يكافيء مصدر الفولتية قضيب توزيع لانهائي عند YE ، محافظاً على فولتية طور $v = V_m \cos \omega t$ باتساع وتردد ثابتين .

وعملياً ، مع ان التردد قد يعد ثابتاً لعطل عند نقطة في منظومة قدرة كبيرة ، فانه سوف يحدث انخفاض في الفولتية .

(ب) C, L, R وكذلك G تكون غير معتمدة على التردد أو التيار أو الفولتية أو الزمن ... ، الخ .

ويتضمن هذا ، من بين الافتراضات الاخرى ، اهمال التغير في متسعة قاطع الدورة وكذلك موصليتها بعد نقطة الصفر — للتيار .

(جـ) تكون فولتية القوس صغيرة بحيث تهمل اذا ماقورنت مع فولتية الدائرة .

(د) يكون تيار العطل ممثلاً كالاتي

$$i_f = \frac{V_m}{Z} \cos (\omega t - \phi)$$

حيث $Z = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}$ and

وكذلك $\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$;

f = تردد المصدر ؛ $\omega = 2\pi f$

لذلك تهمل اية مركبة تيار مستمر عابرة . لذا بعد ان يتم قصم التيار i_f يكون

$$v = V_m \cos \omega t = Ri + L\frac{di}{dt} + v_c \qquad [2.1]$$

$$v_c = \frac{1}{C}\int i_c \, dt = \frac{i_g}{G} \qquad [2.2]$$

$$i = i_c + i_g \qquad [2.3]$$

$$i_g = G v_c \text{ and } i_c = C\frac{dv_c}{dt}$$

وبالتعويض في [2.3] وضربها بـ R

$$Ri = RGv_c + RC\frac{dv_c}{dt} \qquad [2.4]$$

وكذلك

$$L\frac{di}{dt} = L\left(G\frac{dv_c}{dt} + C\frac{d^2v_c}{dt^2}\right) \qquad [2.5]$$

وبتعويض [2.4] و [2.5] في [2.1] وبقسمة كلا الطرفين على LC

$$\frac{V_m}{LC}\cos\omega t = \frac{d^2v_c}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C}\right)\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC}(1+RG)v_c \qquad [2.6]$$

وعندما يحدث عطل في منظومة قدرة ، يتم تجاوز الحمل ، وتكون المقاومة هي مقاومة معدات التجهيز مثل المولدات ، المحولات ، الخطوط .. الخ ، بحيث ان $R \ll \omega L$ ويمكن اهمالها لبعض الاغراض مقارنة بـ $\omega L.$

وبجعل $R = 0$ في [2.6] ينتج .

$$\frac{V_m}{LC}\cos\omega t = \frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{G}{C}\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC}v_c \qquad [2.7]$$

وبأخذ تحويل لابلاس (انظر الجزء الاول من كتاب « نظرية الدوائر » المؤلف من قبل J. O. Scanlan و R. Levy المطبوع ضمن هذه السلسلة) للطرف الايمن بجعل $v_c = 0$ عند $t = 0$ ، ينتج

$$\mathscr{L}(v_c)\left(s^2 + \frac{G}{C}s + \frac{1}{LC}\right)$$

حيث $\mathscr{L}(v_c)$ هي تحويل لابلاس لـ v_c و s هي التردد المركب . واذا كانت جذور المعادلة $s^2 + sG/C + 1/LC = 0$ « خيالية » اي ان $G^2/C^2 < 4/LC$ فسوف يكون هناك تذبذب في الفولتية v_c عبر ملامسات القاطع بتردد طبيعي مساويا الى

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \left(\frac{G}{2C}\right)^2\right)}\ \text{Hz} \qquad [2.8]$$

وهذه الفولتية المتذبذبة ، والتي هي حالة عبور لفولتية اعادة اشعال احادية التردد ، تحدث حول فولتية الاسترداد التي تكون بتردد المصدر الذي مقداره $f = \omega/2\pi$ Hz هرتز .

اذا اهملت كل من R و G، فسوف يتأخر تيار العطل i_f بزاوية $\pi/2$ خلف فولتية المصدر v . وعندما يزيل القاطع العطل في القيمة الصفرية لل 50 هرتز ، فان مركبة فولتية الـ 50 هرتز عبر ملامسات القاطع سوف ترتفع آنياً من الصفر الى V_m، (باهمال فولتية القوس) والتي هي ذروة فولتية الطور . وبما ان $f_n \gg f$ في أغلب دوائر القدرة . لذا يفترض ان فولتية الاسترداد تبقى عند V_m لبضع دورات بالتردد الطبيعي . وبذلك تقلص المعادلة [2.1] عند أخذ تفاضلها الى

$$0 = L\frac{d^2i}{dt^2}+\frac{i}{C}$$

وباخذ تحويل لابلاس ينتج

$$\mathscr{L}(i)\left(s^2+\frac{1}{LC}\right) = 0$$

حيث $\mathscr{L}(i)$ هو تحويل لابلاس لـ i
وتكون جذور المعادلة $s^2+1/LC = 0$

$$s = \pm j\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}$$

و

$$i = A \exp j\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t + B \exp -j\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t$$

وعند $t = 0$ يكون $i = 0$ ذلك لان C تكون قد تم تجاوزها بوساطة قوس ذي موصلية محدودة ، وعلى هذا الاساس فان $A = -B$ و

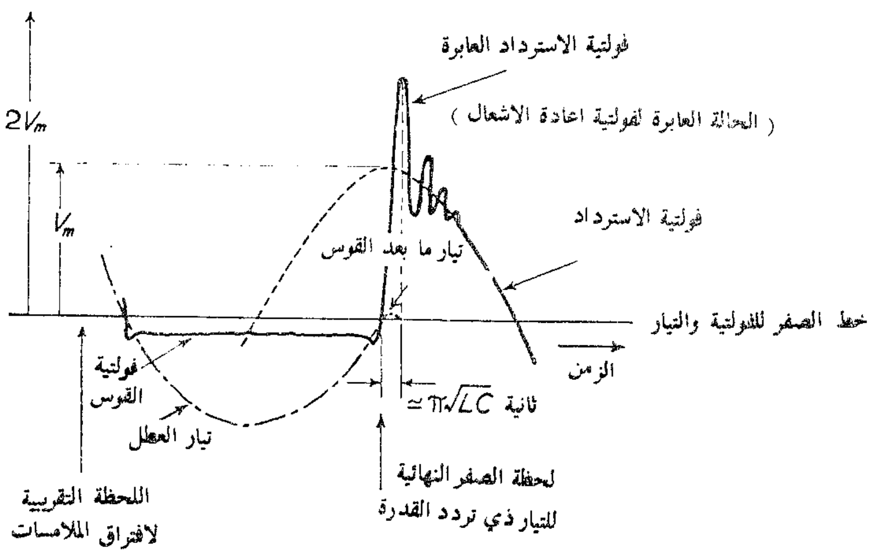
$$\begin{aligned} i &= A\left(\exp j\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t - \exp -j\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t\right) \\ &= 2jA \sin\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t \qquad [2.9] \end{aligned}$$

ومن [2.9]

$$L \frac{di}{dt} = 2jAL\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)} \cos \sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t$$
$$= V_m \text{ at } t = 0 \qquad \text{(من } [2.1]\text{)}$$

وبتعويض قيمة A المستخرجة توا في [2.9] ينتج

$$i = V_m\sqrt{\left(\frac{C}{L}\right)} \sin \sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t$$



الشكل 2.3 حالة عابرة احادية التردد لفولتية الاسترداد (الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال)

اما الفولتية عبر قاطع الدورة (والمتسعة C) فتكون

$$v_c = \frac{1}{C}\int i\,dt = -V_m \cos \sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t + K$$

وعند $t = 0$، تكون $v_c = 0$. وذلك باهمال هبوط فولتية القوس بحيث ان $K = V_m$ وكذلك

$$v_c = V_m\left(1-\cos\sqrt{\left(\frac{1}{LC}\right)}t\right) \qquad [2.10]$$

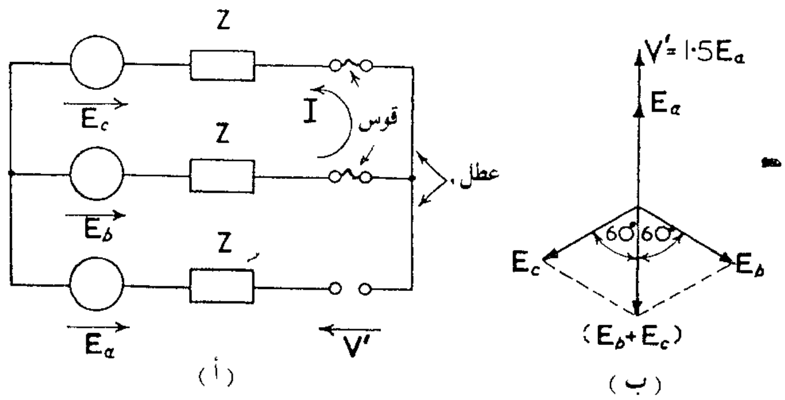
وتبين المعادلة [2.10] انه عند $t = \pi\sqrt{(LC)}$ ثانية . اي بعد $\frac{1}{2}$ دورة عند التردد الطبيعي . قد تصل الفولتية عبر قاطع الدورة لقيمة $2V_m$ ان لم يكن هنالك تخميد . ولعطل عند القاطع او قربه تكون هنالك حالة عابرة لفولتية اعادة الاشتعال بتردد احادي كما موضحة في الشكل 2.3. ويمكن ان يلاحظ ان هذا الشكل يشير الى دائرة لاتكون فيها R و G قليلتين بدرجة تسمح باهمالهما وذلك لان التذبذب في الفولتية يضمحل بسرعة لابأس بها .

ويصبح قصم التيار في دائرة اسهل كلما ازدادت نسبة $R/\omega L$ للدائرة وبصورة مطردة. اي انه اذا كانت $R \gg \omega L$ فسوف تزداد الفولتية عند القيمة الصفرية للتيار من الصفر لتأخذ شكل موجة جيبية ترددها يساوي تردد القدرة الاعتيادي وبدون تذبذب. لذا يكون معدل تصاعد الفولتية قليلا جدا اذا ماقورن مع معدل التصاعد الذي يحدث عندما تكون $R \ll \omega L$ وكما هي الحالة في معظم حالات العطل .

2.5 الطور الاول المستزيل (بصدد الازالة) First phase to clear

بما ان تيارات الخطوط الثلاثة لها ازاحة طور مقدارها $2\pi/3$ درجة نقطرية كل منها بالنسبة الى الاخر . فان الملامسات في احد الاطوار لقاطع ثلاثي الطور يجب ان تقصم التيار في الصفر . بينما تستمر مجموعتا نقاط التماس في الطورين الاخرين حاملة للتيار . واذا كانت نقطة التفرع النجمي للمصدر غير مؤرضة . او ان العطل الثلاثي الطور لم يكن الى الارض وكما مبين في الشكل 2.4 (أ) . عليه فان الفولتية عبر نقاط التماس للطور الاول المستزيل ترتفع بـ 50% اضافة الى قيمتها خلال الزمن الذي يستمر فيه الطوران الاخران بحمل التيار .

وقد افترض ان الاطوار جميعا تحتوي على ممانعات Z متساوية من العطل ورجوعا الى نقطة التوليد . حيث تتولد قوى دافعة كهربائية E_a و E_b , E_c متوازنة : (وللفائدة استخدمت الحروف abc بدلا من RYB لتمثل الاطوار الثلاثة في تسلسل دوران الاطوار .) اما الفولتية V' عبر ملامسات القاطع في الطور a والتي تكون الاولى في عملية الازالة فتعطى بما يلي :



الشكل 2.4 مخطط الدائرة والطور لازالة اول طورعاطل بدون مسار عبر الارض

$$V' = E_a - (E_b - IZ)$$

كذلك

$$I = \frac{E_b - E_c}{2Z}$$

$$V' = E_a - E_b + \left(\frac{E_b}{2Z} - \frac{E_c}{2Z}\right)Z$$

$$= E_a - \frac{(E_b + E_c)}{2}$$

وأيضاً

(انظر الشكل 2.4 (ب)) $\frac{(E_b + E_c)}{2} = -\frac{E_a}{2}$

حيث

$$\therefore V' = 1{\cdot}5\,E_a \quad \text{where} \quad E_a = V_m/\sqrt{2}$$

وترتفع كل من المركبة المتذبذبة ومركبة تردد القدرة للفولتية عبر الطور الاول المستزيل لعطل ثلاثي الطور في دائرة ليس لها مسار ارضي كامل . الى قيم 50% اعلى من المركبة التي في الطورين الاخرين وحتى يتم قصم التيار في هذين الطورين .

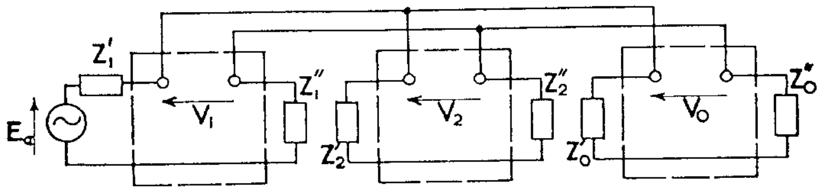
ومما يجب ملاحظته ان حالة عدم التوازن مثل هذه يجب ان تعامل بطريقة المركبات المتماثلة . حيث ستبين هذه الطريقة الظروف المتضمنة في هذه الحالة . لقد بينا في الفصل 8 من الجزء الاول . انه عندما يكون هنـــاك دائرة مفتوحة في احد الاطوار (قـــل الطور a) . فان شبكات التتابع قد تربط لتمثل هذه الحالة كما موضح في الشكل 2.5, . حيث Z_1', Z_2' وكذلك Z_0' هي من ممانعات التتابع التي تكون على جانب المصدر للدائرة المفتوحة و Z_1'', Z_2'' وكذلك Z_0'' تكون على جانب الحمل

او العطل . وان لم يكن العطل (او الحمل) مربوطاً الى الارض وكذلك كانت نقطة التفرع النجمي للمصدر غير مؤرضة كما تحدث آنفا اوكانت وحدها غير مؤرضة تكون كل من Z'_0 و Z''_0 لانهائية ، ويكون $I_0 = 0$. واذا كانت هناك معدات ستاتيكية فقط على جهة العطل ، ا والحمل للدائرة المفتوحة عند قاطع الدورة ، تكون $Z''_1 = Z''_2$. واذا كان بعد القاطع عن مولدات المصدر كافياً بحيث يكون الفرق بين ممانعتي التتابع الموجب والتتابع السالب للمحولات والخطوط طاغيا على الفرق بين هذه الممانعــات للمكائن ، آنئذ تكون $Z'_1 \simeq Z'_2$، بحيث انه اذا كانت $Z_2 = Z'_2 + Z''_2$ و $Z_1 = Z'_1 + Z''_1$، عندئذ $Z_1 \simeq Z_2$. في هذه الحالة ، ولهذه الحالة فقط ، يبين الشكل 2.5 ان

$$V_1 = E_a Z_2/(Z_1 + Z_2) = \frac{E_a}{2}$$

والفولتية عبر الطور الاول المستزيل تعطي كالاتي

$$V' = V_1 + V_2 + V_0 = 3V_1 \simeq 1{\cdot}5E_a$$



الشكل 2.5 ربط شبكات التتابع للطور الاول المستزيل

ولبضع دورات بعد حدوث العطل سوف لاتختلف مفاعلتا التتابع الموجب والتتابع السالب للماكنة التزامنية كثيراً ، ذلك لان الاخيرة هذه هي بالتقريب معدل مفاعلتي التتابع الموجب دون العابرة للمحورين المباشر والتعامدي (انظر الفصل 7 الجزء الاول) ، بحيث انه سوف يحدث ارتفاع بالفولتية يقرب من 50% بوجود مرحل سريع وقاطع حتى لعطل قريب من المولدَ .

2.6 فولتية الاسترداد العابرة المتعددة الترددات

Multi-frequency transient recovery voltage

بدلاً من وقوع عطل ثلاثي الطور عند او قريباً جداً من قضيب التوزيع الذي يكون قاطع الدورة مربوطا اليه . قد يقع العطل عند نقطة تقع بعيداً عن القاطع الذي يجب ان يعزله عن باقي اجزاء المنظومة . لذا سوف تحتوي الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال على اكثر من تردد طبيعي واحد . وابسط حالة هي عندما تكون هناك دائرتان متذبذبتان وكذلك عندما تكون كل من R و G مهملتين في كلتا الدائرتين . وهذا ماموضح في الشكل (2.6.) .

قد يكتب التيار المتذبذب في دائرة جهة العطل المتذبذبة من [2.9] كما يلي

$$\mathbf{i}_2 = 2\mathrm{j}A_2 \sin \sqrt{\left(\frac{1}{L_2C_2}\right)}t$$
$$= 2\mathrm{j}A_2 \sin \omega_2 t \qquad [2.11]$$

عند اللحظة $t = 0,$ ، يكون تيار الـ 50 هرتز (i) قد امتلك قيمة الصفر لتوه . وتماما قبل هذه اللحظة ، يكون كل من التيارين i_1 و i_2 مساويا بالتقريب لـ i اذا كانت $1/\omega C_1$ وكذلك $1/\omega C_2 \gg \omega L_2$ حيث $\omega = 2\pi f$ و f هي ايضا تردد المصدر. لذا وتحت هذه الظروف

$$v_2 \simeq \frac{vL_2}{L_1+L_2}$$

وكذلك عند $t = 0$

$$(v_2)_{t=0} = L_2\left(\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)_{t=0} = \frac{V_m L_2}{L_1+L_2}$$

ومن [2.11]

$$2\mathrm{j}A_2\omega_2 = \frac{V_m}{L_1+L_2}$$

بحيث ان

$$i_2 = \frac{V_m}{\omega_2(L_1+L_2)} \sin \omega_2 t$$

and

$$v_2 = L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} = \frac{V_m L_2}{L_1+L_2} \cos \omega_2 t \qquad [2.12]$$

وعند $t = 0$

$$v_1 = v_2 = \frac{V_m L_2}{(L_1+L_2)}$$

$$K = \frac{V_m}{(L_1+L_2)}\left(L_2+\frac{1}{\omega_1^2 C_1}\right)$$

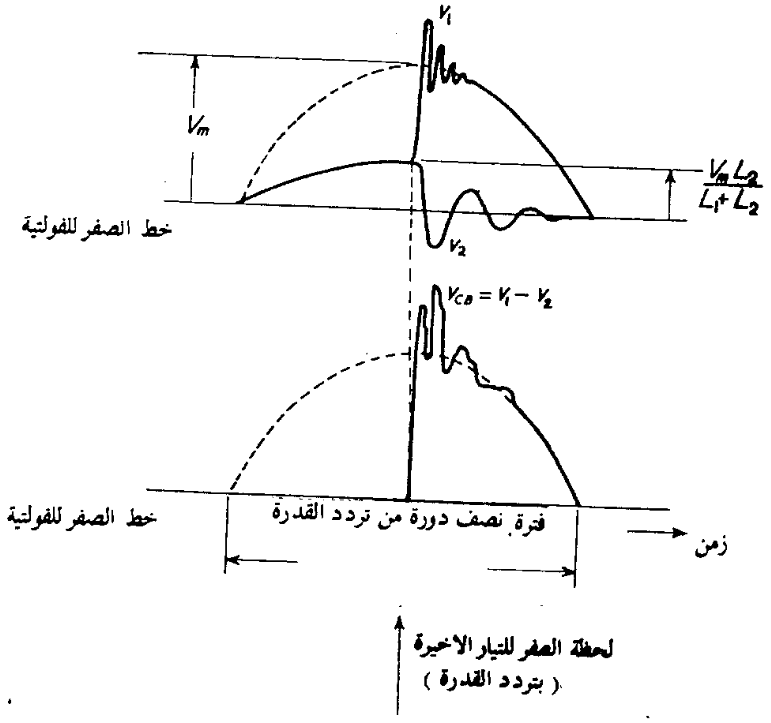
وبالتعويض عن ω_1^2

$$K = V_m$$

$$v_1 = V_m\left(1-\frac{L_1 \cos \omega_1 t}{(L_1+L_2)}\right)$$

وهذا هو جزء التردد الطبيعي للفولتية v_1 فقط ، اي انه يعطي تذبذبا حول V_m بدلاً عن اعطائه حول $V_m \cos \omega t$. وبشمول مركبة تردد المصدر وعمل التقريب اللازم لجعل $1/\omega C_1 \gg \omega L_1$ ينتج :

$$v_1 = V_m\left(\cos \omega t - \left(\frac{L_1}{(L_1 + L_2)}\right)\cos \omega_1 t\right) \qquad [2.13]$$



الشكل 2.7 فولتية الاسترداد العابرة المتعددة التردد (الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال)

الفولتية عبر ملامسات قاطع الدورة هي $v_{CB} = v_1 - v_2$ ، ومن [2.12] و [2.13]

$$v_{CB} = V_m\left(\cos \omega t - \left(\frac{L_1}{(L_1 + L_2)}\right)\cos \omega_1 t - \left(\frac{L_2}{(L_1 + L_2)}\right)\cos \omega_2 t\right) \quad [2.14]$$

وسوف يكون لـكل دائرة متذبذبة مقاومتان صغيرتان وهما R_1 و R_2 على التوالي وتعطي هاتان المقاومتان ثابتي زمن هما $T_1 = L_1/R_1$ و $T_2 = L_2/R_2$ بحيث ان

$$v_{CB} \simeq V_m\left(\cos \omega t - \left(\frac{L_1}{(L_1+L_2)} \exp\left(-t/T_1\right)\right) \cos \omega_1 t - \left(\frac{L_2}{(L_1+L_2)} \exp\left(-t/T_2\right)\right) \cos \omega_2 t\right) \quad [2.15]$$

ويوضح الشكل 2.7 اشكال موجات كل من v_1, v_2 وكذلك $v_{CB} = v_1 - v_2$ التي تظهر رأساً بعد آخر قيمة صفرية للتيار في قاطع الدورة . ان الحالات العابرة للترددات المتعددة يمكن ان تنتج هيئات موجات مختلفة لفولتية اعادة الأشعال الى جانب تلك الموضحة في الشكل 2.7 . ان جميع الحالات العابرة تكون متعددة التردد بدلا من كونها احادية التردد ، وتحتوي اكثريتها على ترددين اثنين بتباعد كبير اي انها من النوع الذي تم توضيحه هنا .

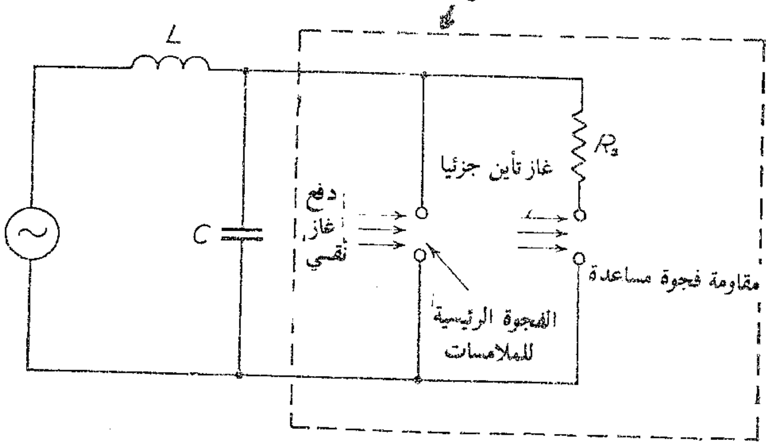
2.7 الأقلدة المقاومية Resistance switching

ان معدل ارتفاع فولتية اعادة الاشعال يمكن تقليله بصورة فعالة وكبيرة باستخدام الاقلدة المقاومية . ففي احد الترتيبات من هذا الشأن يتم تغذية الفجوة الرئيسية لقاطع دورة ذي دفع هوائي بغاز نقي غير متأين ، وعند قيمة الصفر الاولى للتيار بعد افتراق الملامسات ، تكون الفولتية عبر الفجوة الرئيسية والفجوة المساعدة متساوية ، ولـكن الفجوة المساعدة تستلم غازاً متأيناً جزئياً . وتصمم الفجوة المساعدة بحيث يحدث فيها الانهيار بدلاً من الفجوة الرئيسية وبذلك تدخل مقاومة R_s الى الدائرة ، عبر الفجوة الرئيسية وتتوازى مع متسعة الدائرة . وهذه موضحة تخطيطياً في الشكل 2.8 . وفي ترتيب آخر مستخدم الان بصورة شائعة ، تتم الاقلدة المقاومية بوساطة نقطة تلامس ونضاخ منفصلين فمثلا تمتلك قواطع الدورة ذات 400 ك . ف عدداً من الفجوات المقاومية على التوالي لـكل طور اضافة الى عدد من الفجوات الرئيسية .

ويمكن ان يعلم من [2.8] انه اذا كانت $G^2/C^2 = 4/LC$ ، تكون الحالــة العابرةلفولتية اعادة الاشعال ذات الاخماد الحرج . لذلك اذا كانت

$$R_s \leqq \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{L}{C}\right)}$$

فان الفولتية تكون مخمدة بصورة حرجة ، او مفرطة الاخماد ، وتقل في هذه الحالــة (r.r.r.v.) بصورة كبيرة . وتقلل R_s التيار خلال المقاوم وفجوة القوس المساعــدة ، ويتحسن عامل قدرته . بحيث يكون قصم هذا القوس في قيمة الصفر الاولى للتيار الذي يسببه سهلاً نسبياً . وكما تمت الاشارة اليه في اخر الفقرة 2.4 السالفة .



الشكل 2.8. تمثيل تخطيطي لاحدى طرق التوصيل المقاومي.

2.8 معدل أرتفاع فولتية اعادة الاشعال (أو فولتية الاسترداد العابرة)

Rate of rise of restriking (or transient recovery) voltage

ان معدل ارتفاع فولتية اعادة الاشعال او فولتية الاسترداد العابرة والذي يؤخذ في الحالة العابرة الاحادية التردد كونه معدل الميل من قيمة الصفر للفولتية الى الذروة الاولى لمنحنى فولتية اعادة الاشعال ، يكون الى حد ما مقياساً لخطورة فحص او اشتغال فــي موقع ما . وكلما كانت النسبة r.r.r.v. عالية قبل زمن التخلص الايوني لنواتج القوس

وتكون فرصة تجدد الاشعال اكبر . وتكون النسبة .r.r.r.v اكثر اهمية لقواطع الدورة ذات الدفع الغازي منها في القواطع الزيتية في المجال العملي ، حيث يمكن للاولى ان تتحمل قيماً اكبر من تلك المجربة فعلياً في المنظومة وفي الحالة العابرة المتعددة الترددات مثل تلك المبينة في الشكل 2.7 تكون النسبة .r.r.r.v غير معرفة بدقة ولكن يمكن تعريفها بالطرق التجريبية اعتماداً على شكل الموجة (راجع Trencham, 1953) ان مفهوم النسبة .r.r.r.v بوصفه معياراً للخطورة له تحديداته . ذلك لانه لايوجد منحني واحد لشدة العزل الكهربائي لقاطع دورة معين : حيث ان هذه تتقيد بمعالم الدائرة الخاصة بها . وتتأثر نسبة .r.r.r.v بما يأتي :

(أ) قيمة فولتية الطور عند القيمة الصفرية الاخيرة للتيار . وهذه تعتمد على عامل قدرة الدائرة المصابة بالعطل . وكذلك هبوط الفولتية نتيجة ممانعة دائرة المصدر . وأي فقدان في سرعة المولدات ، وكذلك عدم التماثل في موجة التيار .

(ب) قيمة التردد الطبيعي f_n . حيث تكون محطات الفحص من الكبر بحيث تصل الى 100 كيلو هرتز مع انها تكون عموماً أقل من هذه القيمة . وفي منظومات القدرة تتراوح هذه القيمة بين 0·5 و 20 كيلو هرتز لاعطال الخطوط القصيرة حيث تكون بحدود 30 الى 100 كيلو هرتز .

(ج) موصلية ما بعد القوس . وتسهم موصلية الفجوة بصورة كبيرة في الموصلية G المبينة عبر C في الشكل 2.2 . وكلما كانت G كبيرة كان اخماد التذبذب اكبر ويكون الزمن الدوري له اطول .

(د) الاقلادة المقاومية

يكون للطور الاول المستزيل الحد الاتي والذي عنده لايمكن لنسبة .r.r.r.v في الحقيقة ان تقترب منه كثيراً ذلك لكون R و G لاتساويان صفراً ، لذا

$$\text{r.r.r.v.} < \frac{3V_m}{\pi\sqrt{(LC)}} \quad \text{فولت / ثانية}$$

ومع بعض قواطع الدورة الزيتية ، قد يكون زمن التقويس اطول . لقيمة معينة للنسبة .r.r.r.v عند MVA واطئة نسبياً ، منه عندما يتم فحص سعة القصم العظمى المقننة . وفي قواطع الدورة الزيتية يعتمد فعل الاطفاء على توليد الغازات بوساطة القوس لذلك يكون حساساً من قيمة التيار . حيث انه من الضروري ان يتم الفحص عند قيم

اقل من التقنين الاقصى أو مساوية له . وقد استخدمت القيم ، 60 ,30 ,10 ,5 100% من ال MVA المقننة بصورة شائعة لهذا الغرض . ومما يجب ملاحظته ان اجهزة قصم التيار الاخرى مثل المصاهر والقواطع ذات الهبة المغناطيسية يمكن ان تواجة صعوبة كبيرة عند تيارات مفرطة واطئة نسبياً من ان تكون حاملة لسعتها المقننة الكلية ، مع ان الاسباب تختلف من جهاز الى آخر . اماقواطع الدورة ذات الدفع الهوائي فتكون عموماً قادرة على قصم التيار في دارة واحدة أو دارة واحدة صغيرة زائداً نصف الدورة التالية للتقويس على مداها الكلي من ال MVA، ويمكن ان تحقق ذلك قواطع الدورة الزيتية الحديثة أوتقترب من هذا . (والتعبير دارةً يستخدم للدلالة على سريان تيار في اتجاه واحدثم تشويهه من نصف دورة بوساطة مركبة التيار المستمر غير المتماثلة ، انظر الشكل 2.1.) .

ان الفولتيات المفرطة التي يمكن ان تنتج من عملية فتح أو غلق اقليد ، قد تكون لها خاصية خطرة في بعض الحالات . وفي منظومات نقل الفولتية الفائقة E.H.V. تكون مشكلة الصواعق اقل اهمية مما هي عليه في المنظومات ذات مستوى الفولتية الاوطأ ذلك لان تمورات الصواعق نادراً ما تصل الى فولتية الصمد الدفعية لمعدات المنظومة . فمثلاً يتم فحص قاطع دورة 400 ك . ف بفولتية دفعية بموجة 1425 ك . ف 1/50 (جبهة الموجة الى ذروة الفولتية 1 ميكروثانية و 50 ميكروثانية لتنخفض الى pf 50% من ذروة الفولتية) . وفي منظومات ال E.H.V. ، تصبح تمورات الأقلدة على هذا الاساس اكثر ضرورية نسبياً . وكذلك يكون انهيار الفولتية للفجوات ولبعض عوازل المعدات (العوازل السلسلية المعلقة وعوازل الدعامة على سبيل المثال) لتمور مقدمة موجة بحوالي مئة ميكروثانية الى مئتين ، أقل من الانهيار لمقدمات موجات اقصر أو اطول من هذا الزمن ، لذلك فان مقدمات موجات تمورات الاقلدة يمكن ان يقع ضمن هذه المنطقة الحرجة . وهذا سيتم التطرق اليه في الفصل 5. وستتم الان مناقشة الاسباب الرئيسية والاساسية للفولتيات المفرطة الشديدة مع انه من الواضح ان حالات كثيرة لايمكن حصرها يمكن ان تحدث في الحياة العملية والتي هي خارج نطاق هذا الكتاب (راجع Thomas) .

2.9 تقطيع تيار المغنطة Chopping magnetising current

يكون تيار المغنطة لمحول ما صغيراً جداً اذا ما قورن بتيار الحمل الكلي له ، وبذلك يكون صغيراً بصورة تفوق العادة مقارنة مع تيار القصم الأقصى للقاطع .

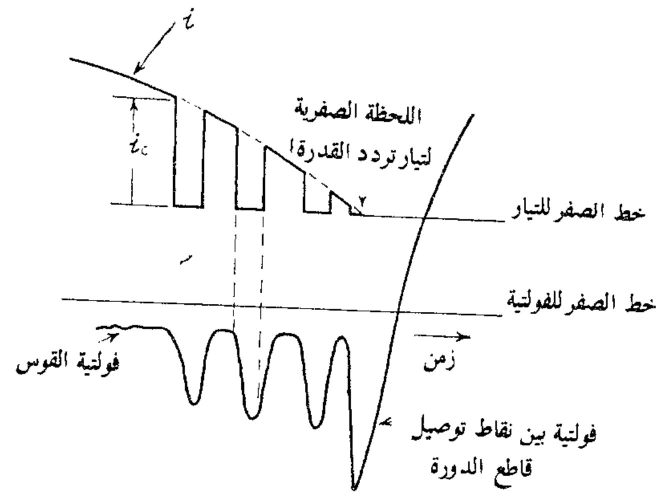
في قاطع الدورة ذي الدفع الهوائـي يكون فعل منع التأين المركز قد صمم ليتعامل مع تيار القطع الاقصـى للقاطع بشكل قد ينتج عنه تحرك النقطة الصفرية لتيار المغنطـة متقدمةً نقطة الصفر لتردد القدرة الاعتيادي وهذه الظاهره تعرف بتقطيع التيار . وتكون قواطع الدورة الزيتية اقل ميلاً للتقطيع لان القصم يكون اكثر « نعومة » ذلك لان ضغط الغاز والاضطراب يعتمدان على تيار القوس الذي تم تقطيعه .

في الدائرة المبينة في الشكل 2.6, يمكن ان تمثل كل من C_2 و L_2 متسعة ومفاعلة مغنطة المحول ، حيث ان $L_2 \gg L_1$. وسيكون هناك انتقال طاقة دوري بيـن المجالات الـكهرومغناطيسية والـكهربائية ، اذا تم تقطيع التيار بصورة فجائية الى الى الصفر من عند قيمة i_c ، والتـي قد تكون بحدود 20 أمبيراً لقواطع دورة ذات دفع غازي . واذا كانت قيمة الفولتية v_2 عبر C_2 عند اللحظة التـي يتم فيها تقطيع التيار هي v_c ، تكون الطاقة الـكلية $v_c^2C_2/2+i_c^2L_2/2.$ وسوف تحدث القيمة القصوى للفولتية v_c تكون الطاقة باجمعها مخزونة في المجال الـكهربائي في المتسعة وسوف تكون هذه الطاقة $\hat{v}_2C_2^2/2$ حيث ان

$$\hat{v}_2 = (v_c^2+i_c^2L_2/C_2)^{\frac{1}{2}} \qquad [2.16]$$

والمحاثة L_2 لملف محول تكون قيمتها بحدود هنري واحد واما المتسعة C_2 فهـي بحدود 10^{-3} ميكروفاراد . ولمحول 60-MVA، 132 ك . ف له ذروة تيار مغنطة قيمتها 18 أمبير و $\sqrt{(L_2/C_2)} = 68\,000$ أوم ، فيكون

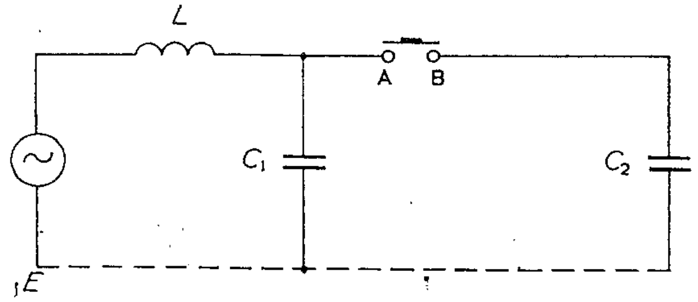
ارتفاع الفولتية الاضافـي نتيجة التقطيع حوالـي 1200 ك . ف اذا كان تقطيع التيار عند قيمة ذروته . وهذه خارج نطاق فولتية الصمد لمعدات المنظومة والتـي هي موجة 550 ك . ف ، 1/50 لمنظومة مؤرضة (انظر الفصل 5) . وعلى هذا الاساس فان قاطـع الدورة يجب ان يصمم بحيث ان فجوة الملامسات تنهار عند فولتيات اقل بكثير مـن هذه القيمة ، اي عند فولتيات اقل من مستوى العزل للمنظومة . ويحدث تذبذب خفيف عندما تستطيل الفجوة مع تباعد وافتراق نقاط التوصيل (انظر الشكل 2.9) ، الى ان يتم اطفاء القوس بصورة نهائية قرب نقطة الصفر الطبيعية لتردد المصدر (50 هرتز) حيث يكون ارتفاع الفولتية فيها معقولاً . اما في حالة الاقلدة المقاومية ، حيـث يتم ربط مقاومات خطية او لا خطية عبر الفجوة الرئيسية بوساطة القوس نفسه، فتقل بذلك الفولتيات المفرطة هذه (انظر الفقرة 2.7) . وعندما تنصب مغيرات اتجاه التمور عند المحولات (انظر الفصل 5) ، تكون المشكلة اقل خطورةً .



الشكل 2.9 تقطيع التيار

2.10 قصم تيار الشحن لخط طويل غير محمل بوساطة قاطع دورة منصوب قرب مصدر التجهيز .

يقصم قاطع الدورة ، المبين طور واحد منه في الشكل 2-10 ، التيار في خط طويل غير محمل له متسعة كلية C_2 حيث تكون $C_2 \gg C_1$. وعندما يصل التيار الى قيمة الصفر بتردد المصدر يتم اطفاء القوس . وتزداد الفولتية بين ملامسات قاطع الدورة فقط مبتدئة من الصفر وبصورة متدرجة جداً ، وقد يضمحل v_{BE} فقط وبصورة بطيئة جداً من V_m كلما تفرغت متسعة الخط تدريجياً (مع أنه اذا كانت الأقلدة المقاومية مستخدمة ربما ينشأ هبوط سريع وكبير في الفولتية قبل أن تضمحل الفولتية المتبقية ببطء نظراً لأن الطاقة من المجال الكهرومغناطيسي تتبدد في المقاوم والقوس الثانوي) . وقد تحدث القيمة الصفرية النهائية للتيار عند فجوة صغيرة نسبياً للملامسات كلما كان ارتفاع الفولتية بعد قيمتها الصفرية بطيئاً نسبياً ، وقد يحدث فعل اعادة الأشعال عندما تصبح هذه الفولتية كبيرة بحيث تكون كافية لأحداث هذا الفعل . واذا حدث اعادة الأشعال هذا بعد نصف دورة ، فان v_{AB} تكون تقريباً $2V_m$ وكما مبين في الشكل 2.11 . وعندما ترتبط A و B بوساطة قوس له تردد قدره ، حيث تكون فولتيته أقل بكثير من فولتية الدائرة ، فأنه يمكن الفرض في الحالة المستقرة ان $v_{AB} = 0$ ، وذلك لكي يتذبذب v_{BE} بالتردد الطبيعي حول الفولتية v_{AE} ذات الـ50 هرتز . وان لم تكن هناك مقاومة في أي جزء من الدائرة فقد تطفر قيمة v_{BE} الى $3V_m$.



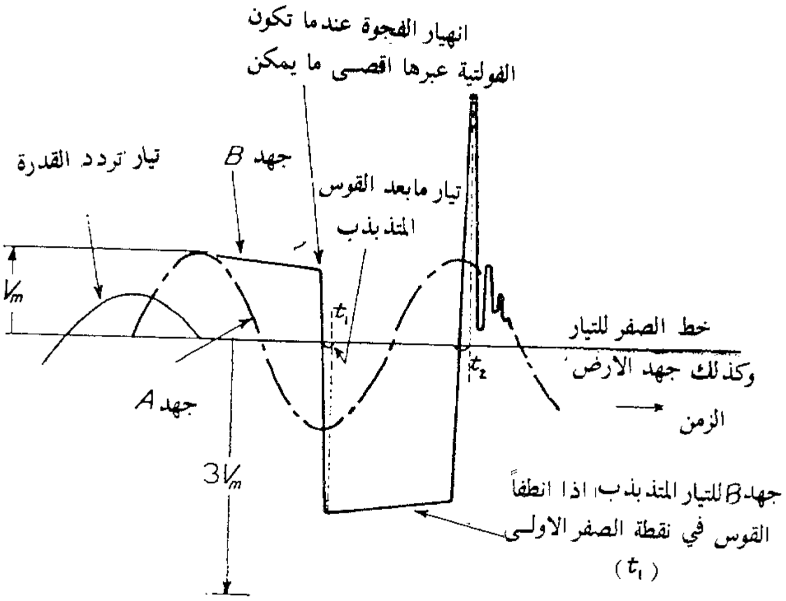
الشكل 2.10. دائرة مكافئة مبسطة لعملية قصم تيار الشحن لخط طويل غير محمل .

في اللحظة t_1 حيث تكون الفولتية بين الملامسات في قيمتها القصوى والتي هي أكبر من V_m . يمر التيار المتذبذب خلال الصفر. وبذلك يكون هناك احتمالان : —

(أ) قد يأخذ أنسياب القدرة خلال القوس مسار تفريغ التيار المتذبذب . وفي هذه الحالة سوف يحدث الأطفاء مرة أخرى عند القيمة الصفرية للتيار ذي تردد المصدر. وفي هذا الحين أما أن تكون الفجوة من الكبر بحيث تكفي لمنع تكرار الأشعال . أوقد يحدث تكرار للأحداث المذكورة في أعلاه.
أو

(ب) قد يحدث أنطفاء القوس عند قيمة الصفر للتيار المتذبذب في اللحظة t_1. . واذا حدث ذلك فان الفولتية v_{BE} عبر متسعة الخط تضمحل ببطء وبعد انقضاء نصف دورة تكون الفولتية بين ملامسات القاطع كبيرة مرة اخرى : حيث انها ربما تصبح $4V_m$ اذا لم تكن للمنظومة أية مقاومات . وقد يسبب انهيار الفجوة هنا طفرة اخرى في الفولتية v_{BE} كما مبينة في الشكل 2.11 . ومن الناحية النظرية فأنه يمكن للأنطفاء ان يحدث عند قيمة صفر اخرى للتيار المتذبذب وعند t_2، على وجه التحديد معطياً بذلك سلسلة من تغيرات الفولتية .

في الحقيقة يضع كل من التخميد والزيادة في طول الفجوة ، في حالة ابتعاد نقطة التماس المتحركة بسرعة من نقطة التماس الثابتة، حدوداً للفولتيات المفرطة الناتجة. لكنه قد تم قياس فولتيات وصلت الى حوالي 3·5 مرة بقدر قيمة الذروة الطبيعية في بعض المنظومات نتيجة لهذا السبب. وتكون القواطع مصممة بحيث يمكن حدوث اعادة اشعال متأخر واحد فقط ، وتحدد بذلك ذروة الفولتية الى الأرض الى 2·5 مرة بقدر فولتية الطور الطبيعية . ان الفولتيات التي يتم عندها فحص اجهزة مثل معدات التوصيل



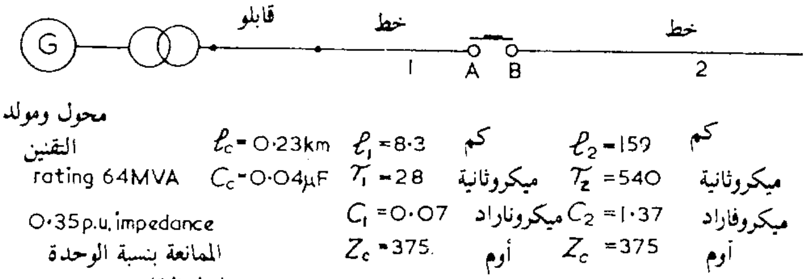
شكل 2.11 أقلدة الفولتيات المفرطة في حالة قصم تيار الشحن لخط طويل غير محمل .

والمحولات (انظر الفصل 5) تكون قيمهاعالية بحيث تكفي للأخذ بنظر الأعتبار الفولتيات المفرطة أثناء الأقلدة هذه .

ولتقليل الفولتيات المفرطة هذه ، تجهزكثيرمن قواطع الدورة الزيتية بأقلدة مقاومية . وعلى العموم فأن قواطع الدورة ذات الدفع الغازي لاتعيد الأشعال عندما تقصم تيار متسعة . وفي الأحوال جميعهافان القواطع ذات الدفع الغازي تستخدم الأقلدة المقاومية ، تستخدم الأقلدة المقاومية ، ذلك لأن دفع الهواء النقي البارد وغير المؤين لة موصلية واطئة جداً (G في الشكل 2.2) مقارنة بموصلية الغازات المقدرة من قبل القوس ذي الحرارة العالية في أي من قواطع الدورة الزيتية ؛ وهذا يعني ان G تكون عموماً أكبر في القواطع الزيتية من قيمتها في قواطع الدفع الغازي ، لذا تعطي تخميداً لفولتية اعادة الأشعال العابرة .

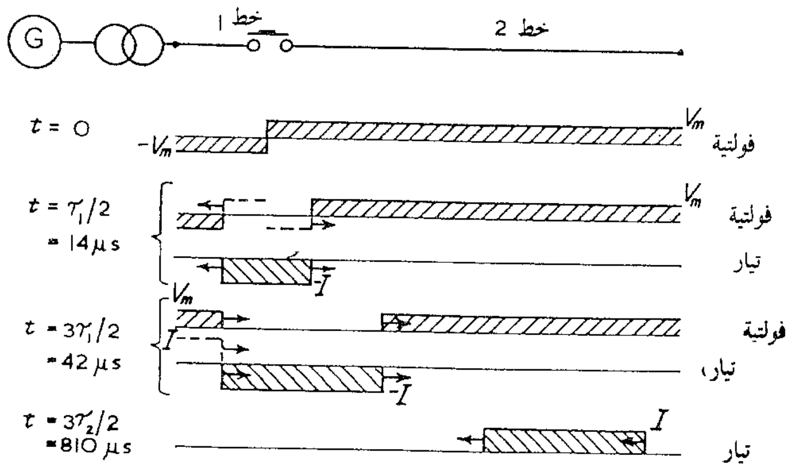
2.11 قصم تيار الشحن لخط طويل غير محمل بقاطع دورة موضوع على مسافة من مصدر التجهيز.

يمكن ان تنتج الأقلدة فولتيات مفرطة بسبب التمورات الحادثة في خطوط النقل. وسيتم التطرق الى مثال خاص لهذه الحالة في هذه الفقرة. أما أعطال الخطوط القصيرة فسيتم التطرق اليها في الفقرة 2.13 . ونقترح مراجعة الفصل 4 قبل قراءة هذه الفقرة. اذا تم وضع قاطع دورة على مسافة عدة أميال من مصدر التجهيز مثلا في منظومة220ك . ف المبينة في الشكل 2.12 . (راجع Gantenbein and Vogelsanger, 1956) فأن تمورات أقلدة تصل قيمتها الى خمسة أمثال ج . م . ت فولتية الطور (أي 3.5 × ذروة فولتية الطور الطبيعية) التي تحدث عند فتح قاطع دورة زيتي بدون أقلدة مقاومية. لاتكون بسبب حالات اعادة اشعال متعاقبة كما أشير اليه في الفقرة 2.10. وبدلاً عن ذلك فانها تكون بسبب التمورات المنتقلة على خطوط النقل المسبية من فتح القاطع. والتي بدورها تتسبب في تقطيع التيار.



الشكل 2.12 مخطط لمنظومة 220 ك . ف بقاطع دورة بين خطوط النقل

وكما ذكر في الفقرة 2.10. نفترض مرة ثانية ان اعادة الأشعال في فجوة القاطع يحدث عند اللحظة ($t = 0$) عندما تكون كل من فولتية التجهيز والفولتية التي بين أقطاب القاطع عند قيمها العظمى. وسوف تسبب أكبر أمواج منتقلة للفولتية والتيار. وبما ان كلا قطبي القاطع A و B تكونان الآن موصولين بخط النقل. ففي لحظة اعادة الأشعال يجب أن تصبح كل من V_{AE} و V_{BE} متساويتين (باهمال فولتية القوس) عند متوسط القيمة بينهما والذي هو صفر (أي جهد الأرض) بعد ان كانت قيمتاهما V_m و$-V_m$ على التعاقب مباشرة قبل اعادة الأشعال. لذلك تتحرك موجتان منتقلتان في اتجاهين متعاكسين بعيداً عن القاطع. $-V_m$ نحو الخط 2 و V_mنحو الخط 1 . وبما ان الاولى تكون موجة منتقلة امامية. فانها تنتج موجة منتقلة أمامية ذات تيار سالب $-I = -V_m/Z_c$ وبالأسلوب نفسه . بما ان موجة الفولتية المنتقلة الثانية هي موجة منتقلة خلفية في الخط 1 ولها ممانعة التمور Z_c نفسها كما للخط 2. فانها تنتج موجة تيار منتقلة خلفية بالقيمة نفسها $-I$.

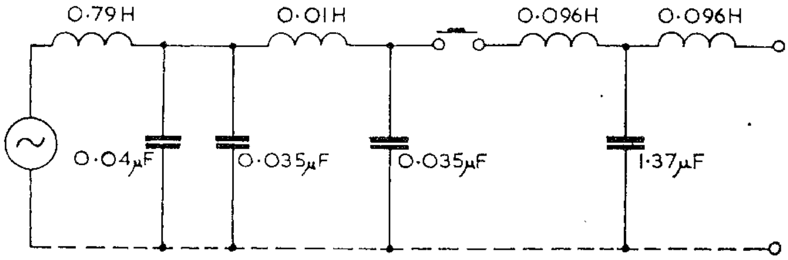


الشكل 2.13. تمورات التيار والفولتية في خطوط النقل للشكل 2.12 في ازمان مختلفة بعد اعادة الاشعال لفجوة القاطع عند $t = 0$.

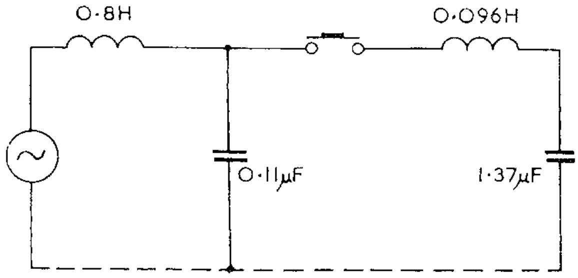
اذا اهمل مبدئياً الطول القصير لقابلو مابين الخط 1 والمولد والمحول. عليه وعند $t = 28$ ميكروثانية تنعكس موجة فولتية مقدارها V_m الى الخلف نحو الخط 1 وذلك بسبب محاثة المولد التي تكون قيمتها عالية جداً والتي تؤلف دائرة مفتوحة افتراضية. وتنشيء الفولتية الأمامية المنتقلة والموجية هذه تياراً موجباً أمامياً. يؤدي سوية مع التيار السالب الخلفي الذي له المقدار نفسه. الى جعل التيار في الخط 1 يؤول الى الصفر. ويمكن التعرف من الشكل 2.13 على ان تمورات التيار في الخطين يكافئان سوية موجة سالبة منتقلة أمامية تتحرك نحو متن الخط 2 وعليه بمقدار $-I$. وبفترة تساوي ضعف الزمن العابر τ_1 للخط I. ويؤخذ الزمن τ_1 على أساس زمن أنتقال تمور يتحرك من طرف واحد من الخط 1 الى الطرف الآخر. ويكون في هذه الحالة 28 ميكروثانية. بحيث ان فترة تيار التمور العابر على متن الخط 2 تكون 56 ميكروثانية. وعند وصول مقدمة موجة هذا التيار الى النهاية المفتوحة للخط 2 وعند $t = \tau_2 = 540$ ميكروثانية. فان نبضة التيار هذه تنعكس وتبدل اشارتها لتصبح $+I$

ولموجة التيار I قيمة $I = \sqrt{2} \times 220\,000/\sqrt{3} \times 375 = 480$ أمبير. ومن $t = 0$ الى $t = 56$ ميكروثانية يمر تيار سالب بهذه القيمة في قاطع الدورة. متبوعا بتيار متذبذب. وقد يحتسب الاتساع الابتدائي لهذا التيار المتذبذب بالتقريب كما يلي (من الواضح انه يمكن عمل حسابات اكثر دقة ولكن الهدف هنا هو تشجيع الطالب ليكون متهيئا لعمل تدقيقات سريعة وسهلة على صحة رتبة مقادير الكميات).

فمن المعلومات الواردة في الشكل 2.12 يمكن رسم الدائرة التقريبية المبينة في الشكل 2.14 (أ) ، حيث تم فيها تمثيل الخط 1 بمقطع II احادي والخط 2 بمقطع T احادي وذلك لـكي نجعل التخمينات تتم بسهولة اكبرسوف يتم احتساب مفاعلة المولد والمحول ذات 0·79 هنري في ادناه .وتقلص هذه الدائرة وبصورة تقريبية الى الدائرة المبينة في االشكل 2.14 (ب) حيث يمكن اعتبارها مكافئة بالتقريب لربط توالٍ لمحاثة $L = 0{\cdot}896$ هنري ومتسعة $C = 1{\cdot}48$ ميكروفاراد .



(أ)



(ب)

الشكل 2.14. دائرة تقريبية لحساب التيار المتذبذب

بما ان التردد الطبيعي f_n يكون اكبر من 50 هرتز فان فولتية تردد القدرة تكون ثابتة تقريبا عند $-V_m$ وخلال نصف الدورة الاولى من تيار التذبذب (انظر الشكل 2.11ـ) . (حيث بينت f_n واطئة لتكون 147 هرتز وبذلك فان الفولتية تتغير حقيقة بين $0{\cdot}87\ V_m$ و V_m)

$$-V_m = L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t + (1/C)\int i\,\mathrm{d}t$$

لقد اعطي حل للتيار في الفقرة 2.4 حيث يتم الحصول عليه من [2.9] .
وباجراء عملية التفاضل ينتج

$$L\,di/dt = 2jAL\sqrt{(1/LC)}\cos\sqrt{(1/LC)}t$$

وعند $t = 0$ ،وحين يتكرر الاشتعال في فجوة القاطع ، فان المعادلات الاولية تعطي (وبسبب كون المتسعة C مشحونة مبدئيا الى V_m) مايلي

$$-V_m = L(di/dt)_{t=0} + V_m$$

$$2jAL\sqrt{(1/LC)} = -2V_m$$

$$I_m = 2jA = -2V_m\sqrt{(C/L)}$$

$$I_m \simeq -\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\,220\,000\,\sqrt{(1{\cdot}48 \times 10^{-6}/0{\cdot}896)}$$

$$\simeq -462\ \mathrm{A}$$

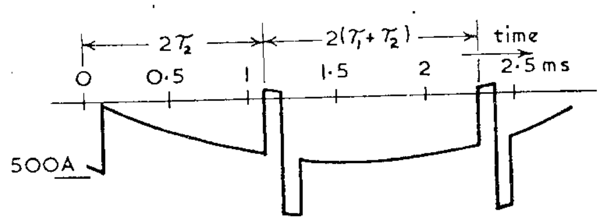
ولهذه المنظومة وجد ان التيار المتذبذب المخمد المار بعد ان تكون فجوة قاطع الدورة قد انهارت عند $t = 0$ ، يمتلك في الحقيقة اتساعا مقداره 490 أمبيرا في نصف الدورة الاول (راجع (Gantenbein and Vogelsanger, 1956)

وقد يحتسب تردد هذا التياركالاتي . تؤخذ ممانعة المولد والمحول لتكون 0·35 بنسبة الوحدة . بحيث تكون الممانعة الاومية المشتركة Z منسوبة الى 220 ك.ف (راجع ملحق [م 1.5] من الجزء الاول) .

$$Z = 0{\cdot}35 \times 220\,000^2/(64 \times 10^6) = 248\ \text{اوم}$$

وهذه الممانعة تكون اقرب تماما لمفاعلة حثية . بحيث ان المحاثة الكلية للماكنة والمحول عند 50 هرتزوفولتية 220 ك.ف حوالي 0·79 هنري . والتي تطغي قيمتها على المحاثة الكلية للقابلو وللخطين كليهما .اما المستعة الكلية للقابلو والخطين فهي $1{\cdot}48 \times 10^{-6}$ فاراد بحيث يكون التردد الطبيعي بالهرتز هو $139 \simeq$. $f_n \simeq 1/2\pi\sqrt{(0{\cdot}896 \times 1{\cdot}48 \times 10^{-6})}\,\mathrm{Hz}$ اما التردد الحقيقي فوجد ليساوي حوالي 145 هرتز . (ومما يجب ملاحظته ان تمثيل الخط 2 في الشكل 2.14 بمتسعة فقط قد يعطي توافقا اقرب للاتساع والتردد للتيار المتذبذب كليهما . وهذا يعني 489 امبير و 147هرتز) .

وعلى هذا الاساس يكون تيار قاطع الدورة في نصف الدورة الاول وبعد فعل اعادة الاشعال موجة جيبية مخمدة لها اتساع مقداره 490 امبير وتردد 145 هرتز ، مع موجات منتقلة للتيار متراكبة عليه وكما مبين في الشكل 2.15.



الشكل 2.15. تيار قاطع دورة في نصف التردد الاول بعد اعادة الاشعال

من الشكلين 2.13 و 2.15 يمكن ان نتبين ان موجة موجبة لتيار ذات فترة زمنية مقدارها 56 ميكروثانية تنعكس الى الخلف من جهة الخط 2, المفتوحة . وتصل هذه الموجة الى القاطع بعد مرور 1.08 ملي ثانية من اعادة الاشعال . اي عند حوالي 60° في التيار المتذبذب ذي تردد 14، هرتز . وتكون قيمة التيار المتذبذب عند تلك اللحظة حوالي 425– امبير . بحيث يكون تيار التمور الذي مقداره 480 امبير كافيا لدفع التيار نحو الصفر . وكما يبين الشكل 2.15، بان التيار يمكن ان يقسر نحو الصفر اربع مرات خلال نصف الدورة الاول عند تحرك تمور التيار الى الخلف والى الامام .

واذا اخذ الان تاثير القابلو بنظر الاعتبار فبسبب كونه قصيرا . يمثل بمتسعة متضامة مقدارها 0.04 ميكروفاراد . لذا سوف يتحول تاثير القابلو فعليا من دائرة مقصورة الى دائرة مفتوحة عندما يصل تمور التيار اليـــه . وبثابـــت زمـــن لهذا التغيـــر مقـــداره $15 = 0.04 \times 375$ ميكروثانية . ان هذا لايصنع اي تبدل جوهري لشكل موجة التيار الموضحة في الشكل 2.15. مع كون النبضات اكثر تعقيدا وقد تعطي اصفارا تيار اضافية على النبضة الثانية الموجبة التصاعد .

قد يتم اطفاء القوس في القاطع عند $t = 1.08$ ملي ثانية عندما يتم بصورة فجائية تقطيع تيار مقداره حوالي 425 امبير . وتكون محاثة المولد والقابلو عند 220 ك ف حوالي 0.79 هنري . ومحاثة الخط 1 هي 0.01 هنري . بينما تكون متسعة القابلو والخط هي 0.11 ميكروفاراد . وقد يعطي التقطيع اللحظي لتيار مقداره 425 امبير تمور

فولتية مقداره $425\sqrt{(0{\cdot}8/0{\cdot}11)} = 1150\ kV.$ ك . ف (راجع المعادلـــة [2.16])) . وهذه قيمة عظمى نظرية تم الحصول عليها بفرض اعادة اشعال يحدث عند اقصى فولتية بين اقطاب القاطع ، كذلك على فرض تقطيع لحظي للتيار وانه ليس هناك اعادة اشعال لفجوة القاطع باقل من 1150 ك . ف . على اية حال فقد امكـــن تسجيل تمورات قد تصل الى 625 ك . ف ($3{\cdot}47V_m$ حيث ان $180 = 220\sqrt{2}/\sqrt{3} =$ ك . ف) في المنظومة ، وبذلك فقد استخدمت الاقلدة المقاومية لــكي تقلل الفولتيات المفرطة للاقلدة الى $1{\cdot}7V_m$ (2·4 x ج . م . ت لفولتية الطور الطبيعي) .

2.12 تمورات الأقلدة في حالة غلق أو اعادة غلق خط غير محمل

Switching surges on closing or reclosing an unloaded line

ان التحسينات التي ادخلت على اداء اعادة الاشعال للقواطع . والتطور الحادث في فولاذ قلوب المحولات . قد عملت في السنين الحاضرة على تقليل الفولتيات المفرطـــة للاقلدة الناتجة عن قصم تيار الشحن للخط وتقطيع تيار المغنطة . وقد تحول الاهتمام الان ، وخاصة لفولتيات 400ك . ف فما فوق . الى تمورات اخرى نسبية التكرار . مثل تلك التي قد تحدث عندما يأقلد خط غير محمل الى دائرة او يعاد غلقه . واذا تم تمثيل خط نقل غير محمل بمتسعة متضامة وربط الى المصدر في حوالي اللحظة التي عندها تعبر فولتية المصدر لطور معين خلال قيمة ذروتها V_m . فسوف تقترب الفولتية عبر متسعة الخط لذلك الطور من $2V_m$. وهذه تطبق للحالة التي تكون فيها مقاومة الدائرة صغيرة نسبياً ويكون التردد الطبيعي للدائرة اكبر بكثير من تردد القدرة . وكما هي الحالة العامة في منظومات القدرة (راجع Rudenberg, 1950)

وتميل الفولتية عبر الخط للوصول الى $2V_m$ بعد نصف فترة الحالة العابرة للتـــردد الطبيعي من غلق الدائرة . حيث يتم ايجاد التردد الطبيعي هذا بوساطة متسعة الخط ، الضخمة (المتضامة) ومحاثة دائرة المصدر . وفي خطوط النقل الحقيقية . يكون هناك تمور للفولتية V_m ينتقل على متن الخط عندما يتم تجهيز الخط بالطاقة . وبسبب الممانعة اللامحدودة للنهاية المفتوحة من الخط أو ممانعة التمور العالية لمحول غير محمل . تميـــل الفولتية في هذه النهاية الى حوالي $2V_m$. وترجع موجة منعكسة من الفولتية قيمها V_m تقريباً على طول الخط والى نهاية التجهيز . (من المقترح مراجعة الفصل 4 أيضا .) . لـــذا فهناك ميل لظهور ضعف الذروة الطبيعية لفولتية الطور مع الارض على الخط نتيجة للتذبذب بالتردد الطبيعي او بسبب الموجات المنعكسة . اما الاول فيكون احتمال وقوعه كبيراً فـــي

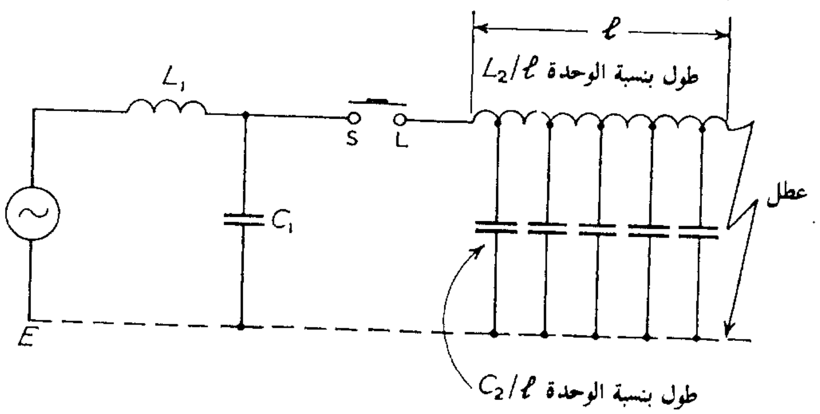
مصدر ذي MVA واطئة . أما الثاني فيكون مع مصدر ذي MVA عالية جدا . وبسبب عدم أقفال المجموعات الثلاث لملامسات أطوار القاطع في اللحظة نفسها بالضبط . وبسبب وجود الاقتران المتبادل بين الاطوار الثلاثة . قد تزداد الفولتية المفرطة عند نهاية الاستلام اكثر حيث قد تم تسجيل فولتيات بحوالي $3V_m$ في بعض منظومات القدرة عند أقلدة خط الى الدائرة .

اذا آزر خط غير محمل ضمن دائرة ما عطلاً عابراً سبب اسقاط القاطع عند نهاية المصدر ثم أعيد غلق القاطع ذاتيا . فان الشحنات المحصورة على الخط يمكن ان تزيد من الفولتيات المفرطة . وقد تحدث قيم تكون مقدرة باكبر من $3V_m$. ويتم توضيح هذه بالاشارة الى خط احادي الطور للسهولة . ان هذه الدائرة تشبه تماماً تلك المبينة في الشكل 2.6 والتي تمثل طوراً واحداً من خط ثلاثي الطور. اذا حدث عطل ارضي عابر على موصل واحد من الخط مسبباً فتح القاطع عند جهة المصدر ونظراً لكون القصم يحدث عند قيمة الصفر لتيار الشحن فان الموصل الصالح يترك مشحوناً عند فولتية الذروة V_m. هذه تكون مشابهة لاضمحلال الجهد البطيء في النقطة B في الشكل 2.11 . وبغض النظر عن الطاقة المتبددة في مقاومة الأقلدة للقاطع أو في مفاعلات التوازي او المحولات . فان شحنة الخط قد تأخذ ثواني كثيرة لتضمحل قيمتها . واذا تم اعادة غلق القاطع ذاتياً . وكان هذا القاطع من النوع ذي الدفع الهوائي . الذي عندما يفتح تغلق ملامساته الرئيسية مع بقاء فاصله مفتوحاً . فان اعادة الغلق تحدث في الفاصل . وفي قواطع الدورة هذه قد يحدث شرر عرضي في فجوة الفاصل قبل حدوث التماس في الملامسات . عندما تصبح الفولتية التي تكون على القطب الاخر من الفاصل (هذا مشابه للجهد في النقطة A في الشكلين 2.10 و 2.11) الموصولة الى المصدر $-V_m$. بحيث تكون الفولتية عبر فجوة الفاصل هي $2V_m$. عند نشوء قوس كهربائي عبر فجوة الفاصل تبعاً لأنهيار تحت هذه الفولتية . فان الجهد عند B يتغير بما قيمته $-V_m$ اي ان موجة فولتية بقيمة $-2V_m$ تنتقل الى نهاية الخط ويحدث لها عند نهاية الخط المفتوحة انعكاس بالقيمة نفسها تقريباً . وبذلك تنخفض الفولتية لـ $4V_m$ تقريباً . لذا تكون الفولتية الكلية عند النهاية المفتوحة من الخط بحدود $-4V_m$ زائداً فولتية V_m تركت من قبل شحنة الخط التي تضمحل ببطء . اي ان محصلة الفولتية النهائية تكون $-3V_m$

مع انه سوف يحدث تضاؤل للتمور نتيجة لمفاقيد الخط بضمنها الحالة ومع ان وجود محول في النهاية البعيدة يقلل الموجة المنعكسة بسبب كون ممانعة التمور له محدودة فأن تأثيرات التبادل الناتجة عن سلسلة اعادة اغلاق الأطوار الثلاثة في خط ثلاثي الطور

سوف تزيد ثانية الفولتية المفرطة . ان القواطع ذات الدفع الهوائي الحاوية على رؤوس محكمة الغلق ومغمورة تحت ضغط والتي تغلق على فجوة التماس الرئيسية ، لاتعطي غالباً فولتيات مفرطة قاسية لانه مع ماقد يحدث من غلق اقليدي اعتباطي قرب ذروة الفولتية المسلطة ، فانه من النادر حدوث انهيار لضغط الهواء العالي قبل اغلاق الملامسات .

ان احدى الطرق التي يمكن بها تقليل الفولتيات المفرطة هذه في منظومات النقل للفولتيات الفائقة (E.H.V.) تكون بربط مقاومة قيمتها بقدر ممانعة تمور الخط (مئات الاومات) على التوالي مع القاطع والخط وتقصر دورة هذه المقاومة بسرعة كبيرة بقاطع دورة ثاني بعد عملية الاغلاق الاولى اوعملية اعادة الغلق . ان هذه الطريقة تستخدم عملياً في الوقت الحاضر مع مقاومة الأقلدة التي مازالت مستخدمة للتوصيل والقطع كليهما وكالمعتاد .



الشكل 2.16. عطل على مسافة قصيرة من قاطع دورة لخط نقل (عطل خط قصير)

2.13 عطل الخط القصير أو العطل الـكيلومتري

Short-line or kilometric fault

اذا ازال قاطع دورة عطلا يبعد عنه بمسافة قصيرة على طول خط نقل . فان الدائرة المبسطة لهذه الحالة تكون كما مبينة في الشكل 2.16. .

وهذه الدائرة تمثل الحالات التالية : —

(أ) عندما يحدث عطل خط واحد الى الارض
(ب) بعد اتمام ازالة الـطور الاول والتي تتبع حدوث عطل خطيـن الـى الارض .
(ج) بعد اتمام عملية ازالة طورين والتي تتبع حدوث عطل ثلاثي الطور الى الارض .
اذا كانت ذروة فولتية الطور هي V_m مرة اخرى فعندئذ بينما يكون القوس موجوداً قبل النقطة الصفرية للتيار تماماً تكون

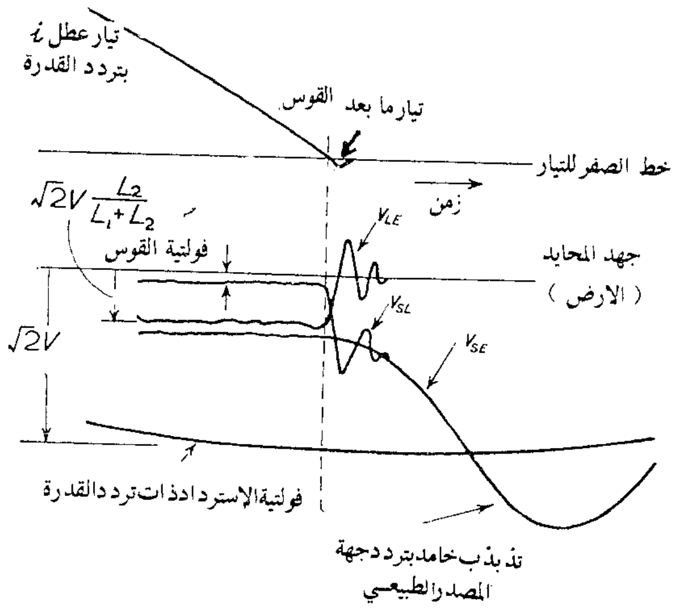
$$v_{LE} \simeq V_m \frac{L_2}{(L_1+L_2)}$$

وكذلك

$$v_{SE} = v_{LE}+v_{arc}$$

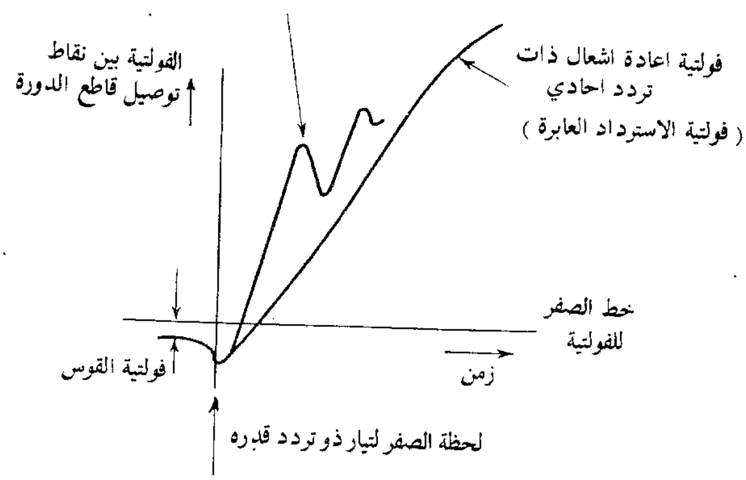
وعقب آخر قيمة صفرية للتيار ، سوف يتذبذب v_{SE} حول فولتية الاسترداد وبتردد يساوي التردد الطبيعي لدائرة جهة المصدر $(1/2\pi)\sqrt{(1/L_1C_1)}]$ تقريباً] والذي يكون عموماً ضمن المدى من 500 الى 5000 هرتز . ان تذبذب v_{LE} عندما يسترخي الخط نحو الحالة غير المشحونة سوف يكون ايضاً موجة جيبية مخمدة وذلك اذا مااعتبر كون محاثة ومتسعة الخط متضامتين ، لكن هذه سوف تحدث ايضاً بتردد اعلى بكثير من المذكور سلفاً وبحدود 30 الى 100 كيلو هرتز . اما تردد جهة الخط f_l فيكون في الحقيقة حوالي 50% اعلى من هذه ويستخرج بصورة اقرب من حاصل قسمة سرعة الضوء c على اربعة امثال طول الخط ، اي $f_l = c/4l$. وسبب هذا هو ان سرعة التمور في خط هوائي العزل تكون مساوية حقيقة لسرعة الضوء ، وان الموجات المنعكسة من نهايتي الخط تتسبب في ان تكرر صيغة موجة الفولتية في نقطة ما دورة كاملة بعد ان تكون الموجات قد تحركت اربع مرات على متن الخط ، وهذا يعني ، مرتين في كل اتجاه (انظر الفصل 4) . لذا فان سرعة التمور تقرب من $u \simeq c = l/\sqrt{(L_2C_2)}$

يمكن للطالب ان يحقق ان تردد جهة الخط f_l يكون $2\pi/4$ مضروباً في القيمة المعطاة من فرض كون محاثة ومتسعة الخط متضامتين . لذا فان الفولتية بين ملامسات القاطـع v_{SL} سوف تحتوي على مركبة لها تردد عال جداً ينتج عنها نسبة r.r.r.v. عالية جداً . وتكون الظروف في الحقيقة اعقد من ذلك ، فالانعكاسات الحادثة نتيجة المعالم المتوزعة تجعل C_2، L_2 v_{LE} تتقرب الى صيغة موجة مثلثية متخمدة وهذه الحالة تزيد اكثر من نسبة r.r.r.v. وكما مبين في الشكل 2.17 . ويبين الشكل 2.18 نسبة r.r.r.v. التي زادت مقارنة مع تردد عابر مفرد لعطل قرب القاطع .



الشكل 2.17 الفولتيات العابرة في حالة قصم لعطل خط قصير

فولتية عابرة لعطل خط – قصير



الشكل 2.18. الفولتية العابرة بين ملامسات قاطع دورة .

وتكون الظروف اقل قساوة لعطل قابلو من عطل خط ، ذلك لان نسبة ٢.٢.٢.٧. لفولتية جهة الخط ، وكما مبينة في ادناه ، تعطى بصورة تقريبية كالاتي

$$\left(\frac{dv_{LE}}{dt}\right)_{t=0} = \sqrt{2}I\omega Z_c \qquad [2.17]$$

حيث I هو ج . م . ت للتيار المقصوم .

وان

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

هي ممانعة التمور للخط أو القابلو .

واذا استخدمت الأقلدة المقاومية مكان المقاومة R_s على التوازي مع فجوة القاطع ، فان معدل الارتفاع الأبتدائي لفولتية جهة الخط يقلص الى

$$\left(\frac{dv_{LE}}{dt}\right)_{t=0} = \frac{R_s Z_c}{R_s + Z_c} \cdot \sqrt{2}I\omega \qquad [2.18]$$

قد يمكن تحقيق المعادلتين [2.17] و [2.18] بالبدء من المعادلة [4.14] لخط عديم الفقد :- وكالاتي

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{C_2}{l}\frac{\partial v}{\partial t} \qquad [2.19]$$

اي ان

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{l}{C_2}\frac{\partial i}{\partial x}$$

$$= -\frac{l}{C_2}\cdot\frac{\partial i}{\partial t}\cdot\frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{l}{uC_2}\frac{\partial i}{\partial t}$$

حيث ان u هي سرعة الانتشار وتكون $l/\sqrt{(L_2C_2)}$

اي ان

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\sqrt{\left(\frac{L_2}{C_2}\right)}\frac{\partial i}{\partial t} = -Z_c\frac{\partial i}{\partial t} \qquad [2.20]$$

واذا فرض ان التيار المقصوم يكون جيبياً بحيث $i = -I_m \sin \omega t$ (الاشارة السالبة تدل على ان نقطة الصفر للزمن منتخبة لتكون في لحظة انتهاء نصف الدورة الموجبة للتيار) ، عندئذ

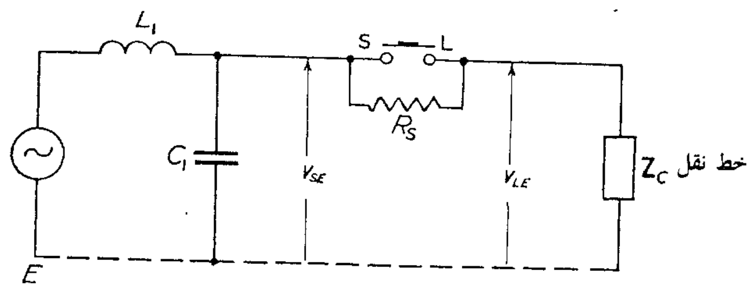
$$\frac{\partial v}{\partial t} = Z_c I_m \omega \cos \omega t$$

وكذلك

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{t=0} = \sqrt{2} I \omega Z_c$$

والتي هي [2.17] .

اما اذا استخدمت الأقلدة المقاومية فعندئذ تكون الدائرة كما موضحة في الشكل 2.19 من غير المتوقع في هذه الدائرة ان تتعدى قيمة المفاعلة الحثية للمحاثة L_1 عند تردد القدرة أوماً واحداً . على هذا الاساس سوف تكون C_1 ولتردد طبيعي ونموذجي لجهة المصدر مقداره 5 كيلوهرتز بحدود 1 ميكروفاراد . واذا شملت v_{LE} مركبات لحد 100 كيلوهرتز ، تكون مفاعلة C_1 مبدئياً بحدود أوم واحد ، وتكون R_s فعلياً على التوازي مع الخط لبضع ميكروثواني الاولى بعد عملية القصم ، بحيث ان [2.17] تعوض بـ [2.18] .



الشكل 2.19 دائرة مكافئة بسيطة لعطل خط قصير مع أقلدة مقاومية

وتبين المعادلة [2.17] أنه في حالة عدم أستخدام أقلدة مقاومية فلخط 50 هرتز بممانعة $Z_c = 350$ أوم وتيار مقصوم مقداره 50 كيلو أمبير (ج . م . ت) ، سوف تكون نسبة r.r.r.v. حوالي 8 ك . ف / ميكروثانية . وهذه قيمة عالية جداً في سعات قصم كبيرة بحدود 35 000 MVA. ولايضاح الارتفاع الحادث في السنوات الاخيرة ،

يجب أن يلاحظ أن القيم النموذجية لمنظومات العالم في سنة 1956 (Mortlock, 1956) . تتراوح من 1 ك . ف / ميكروثانية عند 3000 MVA الى 6 ك . ف / ميكروثانية عند 500 MVA وقد تنتج القيم العالية جداً للنسبة r.r.r.v. والـ MVA الناجمة عن اعطال الخط القصير تيار مابعد القوس كاف لكي يؤدي الى اعادة اشعال حراري للقوس ، ويفرض بذلك مشاكل في تصميم واداء قاطع الدورة . خاصة لقواطع الدورة ذات الدفع الغازي التي سعاتها اكثر من 30 كيلو أمبير .

من الشكل 2.17 يمكن ملاحظة مايلي : بما ان التردد f_l للحالة العابرة لجهة الخط يكون اكبر بكثير من تردد الحالة العابرة لجهة المصدر فان نسبة r.r.r.v. تكون $\mathrm{d}v_{SL}/\mathrm{d}t \simeq \mathrm{d}v_{LE}/\mathrm{d}t$. وبما ان v_{LE} ينخفض كما مبين من $V_m L_2/(L_1+L_2)$ الى الصفر في حوالي ربع دورة تذبذب جهة الخط ، عندئذ

$$\left(\frac{\mathrm{d}v_{LE}}{\mathrm{d}t}\right)_{t=0} \simeq \frac{V_m L_2 4 f_l}{L_1+L_2}$$

وبما ان $f_l \simeq c/4l$

$$\left(\frac{\mathrm{d}v_{LE}}{\mathrm{d}t}\right)_{t=0} \simeq \frac{V_m L_2 c}{l(L_1+L_2)}$$

$$V_m \simeq \sqrt{2} I\omega(L_1+L_2)$$

بحيث ان

$$\left(\frac{\mathrm{d}v_{LE}}{\mathrm{d}t}\right)_{t=0} \simeq \sqrt{2} Ic\omega L_2/l \qquad [2.21]$$

وهذه المعالجة تقريبية جداً فقط اذ انها تهمل التغير الحاصل في مفاعلة الخط مع التردد وتعد صيغة الموجة للفولتية v_{LE} مثالية في الربع الاول من الدورة ، لكن [2.21] تشبه [2.17] . ولما كانت المحاثة لكل وحدة طول (L_2/l) لخط نقل علوي معلق لاتتغير كثيراً مع الفولتية والتركيب (راجع الفصل 2 من الجزء الاول) ، فان [2.21] تخدم في الاشارة الى ان النسبة r.r.r.v. تعتمد بصورة رئيسية على مقدار تيار العطل . لهذا السبب تقل النسبة r.r.r.v. ويكون القصم أسهل اذا ازداد طول الخط بين القاطع وموقع العطل ، وينتج عن ذلك انخفاض تيار العطل نفسه . على اية حال يكون هذا صحيحاً لطول يتجاوز الطول الحرج للخط والذي يكون عادة بين 0·8 الى 8 كيلومترات ، ذلك لانه كلما نقص طول الخط باقل من هذه المنطقة الحرجة يكون

القاطع قادراً على قصم تيار اكبر . والسبب القوي في ذلك يكمن في ان القصم في القاطع ذي الدفع الغازي ، وهو النوع الاكثر تأثراً بالعطل الحادث ضمن هذا الطول القصير والحرج للخط ، يتقرر ضمن فترة بضع ميكروثانية للقيمة الصفرية للتيار بوساطة توازن الطاقة بالدرجة الاولى ، وقد يكون الانعكاس الاول قد حدث فعلاً في الجزء المبكر من هذه الفترة اذا كان العطل قريباً جداً من القاطع . وعلى سبيل المثال ، لعطل يبعد 0·4 كيلو متر عن القاطع ، قد تصل v_{LE} الى ذروتها الاولى في حوالي ميكروثانية واحدة وسوف تهبط بعدها كما موضح في الشكل 2.17 وقد لايحدث حينئذ تجدد اشعال حراري عند تيار عطل المنظومة المعين ، ولكنه قد يحدث عند تيار يتجاوز مستوى العطل المخصص للمنظومة فقط . لهذه الاسباب تكون ظروف عطل الخط القصير اكثر حرجاً عندما يكون طول الخط بين القاطع والعطل واقعاً بين حدين اثنين ، وهذان الحدان يكونان عادة حوالي 1 و 8 كيلومترات .

2.14 الوضع الحاضر في قطع دائرة

في الوقت الحاضر ، تستطيع قواطع الدورة الزيتية من النوع المتعدد الفصل ذات منظومات تدرج فولتية واخماد مقاومي وملامسات عالية التسارع ، ان تقصم في الاقل 25 000 MVA عند 330ك . ف . لقد تم بناء قواطع ذات دفع هوائي تؤدي اثنتي عشرة حالة قطع على التوالي في كل طور ومزودة بمقاومة لفصل القوس ذلك لقصم 35 000 ميكافولت أمبير ، وهذا يعني 50 كيلو أمبير عند 400 ك . ف ، وقد يتطلب تصميمها مستقبلاً لتقنينات أكبر ، مثل 60 و90 كيلو أمبير عند 1000 ك . ف أو اكثر . وتمتلك القواطع المضغوطة المغمورة هواء عند حوالي 2·7 MN / م^2 وفي بعض الحالات قد يصل الى 7 MN / م^2 ، يكون جاهزاً في القاطع عندما يكون هذا الاخير في وضع الاقفال ، ويتم اطلاق الهواء خلال فجوة الملامس عند افلات القاطع . حيث تتمخض هذه العملية عن تحقيق ازمان تشغيل قصيرة .

لما كانت محطات فحص الدائرة القصيرة ، حيث تجرى فيها فحوص تاكيدية على القواطع والمعدات الاخرى مباشرة من مولدات مقصورة الدائرة ، تمتلك تقنينات تصل الى 5000 MVA ، وليس من الاقتصادي زيادة هذه التقنينات الكلية للقاطع ، فقد اصبح من الضروري بمرور السنوات تبني طريقة فحص الوحدة للقواطع الكبيرة ، ويعني ذلك ان وحدة واحدة او اكثر من تلك التي تؤلف طوراً واحداً من القاطع تفحص بصورة

مستقلة . ان احد المشاكل الرئيسية ، عند ذلك ، تكمن في ايجاد فولتية اعادة الاشعال اللازمة لاجراء الفحص عبر الوحدات المختلفة وهذا يعتمد على ظهور الفولتية عبر الطور الأول المستزيل ، وتوزيع الفولتية عبر الطور نفسه للقاطع .

قد تصمم فولتية الاسترداد بحيث تكون مقسمة بالتساوي بين الوحدات ؛ وذلك بربط مقاومات عبر الفجوات . وبسبب الترددات العالية الموجودة في الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال الطبيعية او تحت ظروف عطل الخط القصير ، فان توزيع الفولتية سوف يكون متوسطا مابين الفولتية الناجمة عن المتسعات بدون مقاومات ، والتوزيع المنتظم بالمقاومة فقط . وسوف يكون عبر الوحدات القريبة من المصدر فولتية اعلى اذا لم توجد هناك مقاومة نتيجة لوجود المتسعة الى الارض (راجع الحالة المثيلة لتوزيع الفولتية عبر العازل السلسلي في الفصل من الجزء الاول) . وفحوصات الوحدة هذه تسند بفحوصات كاملة على الاطوار بحيث يتم قصم تيار تام بفولتية مخفضة . وكذلك قصم تيار مخفض عند فولتية تامة .

تضع الفحوصات الوحدية تحديدات على التصميم ، وهي ان جميع وحدات القصم يجب ان تكون متماثلة وغير معتمدة بعضها على بعض ، وان لها سعة قصم ضمن تلك التي لمحطة الفحص . ان التوسع غير الاقتصادي في النصب المباشر لمولد ومحول قد ادى الى ظهور عدد من الدوائر لغرض الفحص الاصطناعي حيث يتم تجهيز التيار والفولتية من مصادر متعددة . ويتم الحصول على فولتية اعادة الاشعال من مصدر واطيء للطاقة يكون عبارة عن خازن متسعات حيث يكون هذا لازما لقواطع الدورة ذات الفولتية العالية التي تكون فيها فولتية الاسترداد اكبر بكثير من فولتية القوس ، ويتم الحصول على التيار من مولد ومحول موجودين ضمن التأسيسات الموجودة . وقد جرت اختبارات مكثفة للفحص الاصطناعي في محاولة لجعله شاملا لجميع اوجه اختبار قاطع الدورة . ان حالات التكافؤ بين الفحوص الاصطناعية والفحوص المباشرة سيشار اليها في الفقـــرة القادمة .

في الوقت الحاضر هناك قواطع دورة تستعمل غاز سادس فلوريد الكبريت (SF_6) تحت الانتاج وتصل الى حوالي 400 ك . ف . وهذا الغاز يمتلك مميزات خاصة تفوق مميزات الهواء في قطع الدائرة . وهذه الخواص لاتنحصر كليا بالصيغة الكهربائية السالبة له ، ولكنها تنتج بصورة جزئية من التشتت الحراري الواطيء له وكذلك بسبب مواصلته الحرارية العالية وشدة العزل الكهربائي العالي مع انه توجد عوامل اخرى كثيرة لها دخل في اختيار غاز معين .

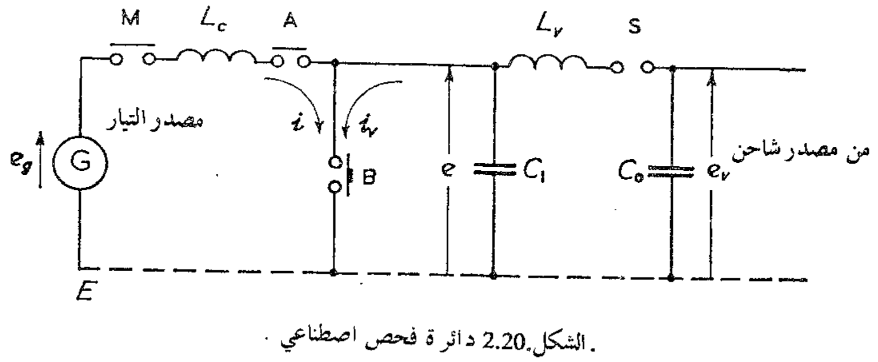
ومع ان المقاليد المفرغة واجهت في البداية صعوبات معينة عند 10 كيلوامبير، الا انها الان صنعت لتقصم في الاقل 40 كيلوامبير. وتتيسر بعض من هذه المقاليد لاستخدامها الى حد فولتية 132 ك. ف. ويتضمن اسلوب التصنيع استعمال مواد مركبة للاقطاب مسقولة المقاطع. ويتم تفريغ تقريبـــي للاقليد الى حوالي 10^{-8} تور (ملم زئبق) ، متبوعاً بالحقن خلال عملية التسخين في درجات عالية مَن الحرارة وخلال القوســ الـكهربائي قبل تغليفه بصورة نهائية. ان الاقليد المفرغ سوف يعطي امكانية ايجاد معدات قصم متضامة جدا لمديات اكبر كلمـــا تقدمـــت البحـوث فـى هــذا المجال.

2.15 حالات التكافؤ بين الفحوص المباشرة والأصطناعية

The conditions for equivalence between synthetic and direct tests

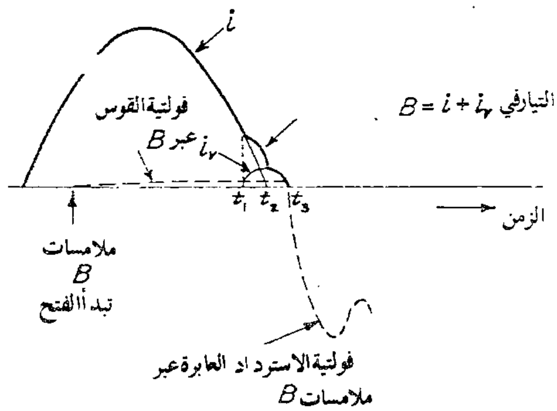
يبين الشكل 2.20 احد دوائر الفحص الاصطناعي التي تعرضت لـكشوف مركزة، تنتج فيها دائرة الفولتية فولتية اعادة اشعال على التوازي مع القاطع الذي تحت الفحص وفي هذه الدائرة تم اعطاء المكونات الرموز التالية :
G مولد، M اقليد وصل، A قاطع مساعد، B قاطع تحت الفحص، S فجوة شرارة.

عندما يكون A مغلقا، تحدث عملية غلق M مرور تيار i بتردد 50 هرتز في وبعد غلق M متاشرة. يفتح A و B كلاهما تماما قبل لحظة وصول i الى الصفر (اللحظة t_1 في الشكل 2.21) ، اما دائرة الفولتية التي فيها C_0 فتكون مشحونة توا وتسلط على B بوساطة اشعال S, بحيث ان التيار i_v يمر ايضا في B. وعندما



الشكل 2.20 دائرة فحص اصطناعي.

يجلب قاطع الدورة A التيار i الى الصف عند اللحظة t_2، يحمل قاطع الفحص تيار خازن المتسعات المتذبذب i_v حتى يحصل هذا على قيمته الصفرية عند اللحظة t_3 عندما تسلط فولتية اعادة اشعال بتردد يتحدد بالمتسعة C_1 والمحاثة L_v على القاطع (انظر الشكل 2.21) . فاذا كانت $C_0 \gg C_1$ وكانت الطاقة المخزونة في C_0 عند شحنة قبل الفحص اكبر بكثير من الطاقة المفقودة في دائرة التذبذب وفي قاطع الدورة عندما يحمل تيار i_v ، تكون الفولتية عبر C_0 ثابتة تقريبا عند قيمة e_v



الشكل 2.21 تتابع أشكال الموجات في فحص اصطناعـي

خلال التذبذب العابر . لـكي يفرض الفحص الاصطناعي شروط الفحص المباشر نفسها فيجب ان تكون الفولتيات والتيارات اللحظية هي نفسها للاثنين . بينما يكون القاطع مربوطا الى مصدر التيار في الدائرة التي في الشكل 2.20 . فان

$$L_c\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+v_{arc} = e_g$$

حيث ان فولتية القوس v_{arc} تكون صفرا لقاطع دورة مثالي . لذلك

$$L_c\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \simeq e_g \qquad [2.22]$$

وعندما يربط القاطع الى فولتية المصدر وتكون الفولتية e عبره فان.

$$L_v\frac{\mathrm{d}i_v}{\mathrm{d}t}+L_v\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(C_1\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right)+e = e_v$$

ومرة اخرى لقاطع دورة مثالي يكون تيار مابعد الصفر $i_v = 0$ بحيث ان .

$$L_v C_1 \frac{d^2 e}{dt^2} + e = e_v \qquad [2.23]$$

في الدائرة المبينة في الشكل 2.2 اذا كانت $R = 0$ و $G = 0$ وكذلك كان المصدر الذي ينتج الفولتية v هو وحدة مولد محول مقصورة الدائرة يمكن استخدامه لفحص القاطع بصورة مباشرة عندسعته الـكلية المقننة للقصم . لذا تكون المعادلات المناظرة لـ 2.22 و 2.23 كما يلي

$$L \frac{di}{dt} = v$$

وعندما يغلق القاطع . يمكن اهمال فولتية القوس . لذلك

$$LC \frac{d^2 e}{dt^2} + e = v$$

بحيث ان الفحصين المباشر/الاصطناعي سوف يكونان متكافئين لقاطع دورة مثالي اذا كان $e_g/L_c = v/L$ و $e_v = v$ و $L_v = L$ وكذلك $C_1 = C$

اذا كان الفقد في دوائر الفولتية والتيار قليلا ، فان قدره فحص المحطة تكون اصغر بكثير من سعة القصم للقاطع نفسه . وللقواطع الحقيقية التي تمتلك فولتية قوس وتيار مابعد الصفر محدودين . لايوجد تكافؤيذكر الا اذا كانت الظروف جميعها متساوية ، اي ان : —

$$e_g = v = e_v$$
$$L_c = L = L_v$$
$$C = C_1$$

لـكن لهذه الظروف يجب ان تمتلك دوائر التيار والفولتية قدرة مساوية لسعـة القصم .

على هذا الاساس فان تكافؤا تاما يكون غير ممكن . وقد كرست بحوث كثيرة لتعيين المعالم للدوائر الاصطناعية لـكي تعطي في الاقل شدة معلومة تكون بقدر تلك التي يعطيها الفحص المباشر. وقد بينت التمحيصات لحد هذا الوقت انه لقواطع ذات الدفع

الهوائي ، والتي لاتمتلك وسائل اطفاء القوس بسبب الطاقة المتحررة خلال نشوئه ، لاتعطي دوائر حقن التيارات المتوازية المبينة في الشكل 2.20 اختلافا ملموسا في القساوة اذا ماقورنت بالفحوصات المباشرة لحد 1200 MVA ، ومن المعتقد ان هذه سوف تبقى كذلك عند تقنيات اعلى (راجع Anderson والاخرين ، 1966 و 1968) .

المراجع

ANDERSON, J. G. P., ELLIS, N. S., MASON, F. O., NOBLE, R. G., ORTON, L. H., REECE, M. P. & STEEL, J. G. 1966 and 1968. Synthetic testing of a.c. circuit breakers; Part 1, Methods of testing and relative severity. *Proc. I.E.E.* **113**, No. 4, 611–621; Part 2, Requirements for circuit breaker proving. *Proc. I.E.E.* **115**, No. 7, 996–1007.

BALTENSPERGER, P. & RUOSS, E. 1960. The short-line fault in high-voltage systems. *Brown Boveri Revue*. 47, 329–339.

BOLTON, E. *et al.* 1970. Short-line fault tests on the C.E.G.B. 275-kV system. *Proc. I.E.E.* **117**, 771–784.

EDELS, H. 1962. Arc interruption and circuit breaking. *Electrical Review*, 1006–1010.

GANTENBEIN, A. & VOGELSANGER, E. 1956. New experiments concerning the disconnection of unloaded transformers and transmission lines by minimum oil-content circuit breakers. *Bulletin Oerlikon*, No. 316, 53–61.

GUILE, A. E. 1962. Interruption of short-line faults in high-voltage systems, World Power Engineering. **1**, No. 3, 22–24.

LYTHALL, R. T. 1963. *J. and P. Switchgear Book*. Johnson and Phillips Ltd., London, 6th edition.

MORTLOCK, J. R. 1956. *A.C. Switchgear*. Volume 1: a survey of requirements. Chapman & Hall, London.

RUDENBERG, R. 1950. *Transient Performance of Electric Power Systems*. McGraw-Hill, New York.

SABATH, J., SMITH, H. M. & JOHNSON, R. C. 1966. Analog computer study of switching surge transients for a 500-kV system. *I.E.E.E. Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS. **85**, No. 1, 1–9.

SWITCHING SURGES, 1—phase to ground voltages. 1961. *Transactions A.I.E.E.*, **80**, 240–261.

THOMAS, A. M. 1966. The switching surge strength of insulating arrangements above 100 kV. *E.R.A. Report* No. 5080.

THOMAS, A. M. 1966. Switching surges in extra high voltage transmission systems—a critical review of recent studies of amplitudes, waveforms and frequencies of occurrence. *E.R.A. Report* No. 5171.

TRENCHAM, H. 1953. *Circuit Breaking*. Butterworths Scientific Publications, London.

YOUNG, A. F. B. & ELLIS, N. S. 1963. The short-line fault. *Electrical Review*. **173**, 271–274.

مسائل

1. جهزت منظومة قدرة 132 ك . ف بتعويض تفاعلي متوازي قدره 50 MVAr وتحتوي تأسيسات المنظومة على ثلاثة ملفات مفاعلة مربوطة على شكل نجمي وبتأريض لنقطة التفرغ النجمي . أما متسعة الملفات ، فيمكن اهمالها ولكن الجلبات العازلة للفولتية الفائقة E.H.V. لكل طور لها متسعة بالنسبة الى الأرض مقدارها 1000 بيكوفراد . فما مقدار الفولتية المفرطة الناشئة على الملف المفاعل في هذه الحالة . عندما تكون المنظومة غير محملة وقد فصلت بقاطع ذي دفع هواء يقصم تياراً مقداره 10 أمبير ؟ (ان قدرة المصدر بالـ MVA كبيرة ويمكن اهمالها في الحسابات) . ما تأثير ربط مقاوم قيمته 40 أوم عبر قاطع الدورة ؟

(الجـواب : 349 ك. ف. ، 182 ك. ف) .

2. مولد ثلاثي الطور ، 50 هرتز 200-MVA مربوط خلال محول قدرته 200-MVA الى خط نقل فولتيته 132 ك . ف . توجد محطة ثانوية على بعد 32 كم من المولد تحتوي على قاطع دورة مربوط اليه خط نقل مماثل ثان . اذا وقع عطل خط — الى — أرض على مسافة 0·8 كم ، على الخط الثاني هذا ، من المحطة . فاحسب الترددين الطبيعيين للدائرة ومعدل ارتفاع الفولتية الابتدائي عبر ذلك القطب من ملامسات قاطـــع الدورة .
كل موصل في الخط له محاثة مقدارها 1·25 ملي هنري /كم ومتسعة إلى الارض مقدارها 0·00935 مكروفاراد /كم . وفي وقت اطفاء القوس قد تفرض المفاعلة الحثية بنسبة الوحدة للمولد والمحول مجتمعين في الطور العاطل تساوي الى 0·25 عند الفولتية والقدرة MVA المقننين . مع فولتية مؤثرة خلف هذه المفاعلـــة مقدارها 1·2 بنسبة الوحـــدة .
(الجواب 878 هرتز ، 58·1 كيلوهرتز ، 0·43 ك .ف/ ميكروثانية) .

3. منظومة ثلاثية الطور تحتوي على مولد ذي نقطة تفرع نجمي مؤرضة خلال ملف مفاعل قيمته 1·0 بنسبة الوحدة ، ربط هذا المولد الى خط نقل 132 ك . ف طوله 16 كم خلال محول A نجمي / نجمي مع تأريض نقطتي التفرع النجمي للمحول والمولد كليهما معاً . أما محاثة كل موصل من الخط فهي 1·25 ملي هنري / كم . وكان في النهاية البعيدة للخط محول B نجمي ، مثلثي بحيث ارضت نقطة

التفرع النجمي للابتدائي فيه . حدث عطل ثلاثي الطور عند اطراف الثانوي للمحول *B.* أحسب ج . م . ت لفولتية الاسترداد عبر الطول الاول المستزيل لقاطع دورة مربوط الى اطراف الثانوي للمحول *A.* قد يفترض ان الاقلدة المقاومية تخمد الحالة العابرة لفولتية اعادة الاشعال مباشرة . وان المولد الذي فرض كون القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فيه ثابتة ومقدارها 1·0 بنسبة الوحدة . له مفاعلات يمكن عدها ثابتة خلال الزمن القصير للعطل . يمكن اهمال جميع المقاومات والمتسعات للخط . أما المفاعلات بنسبة الوحدة عند 200 MVA وفي الفولتية المقننة فتكون كما يلي :

المولد

$X_1 = 0·12$ بنسبة الوحدة

$X_2 = 0·15$ بنسبة الوحدة

$X_0 = 0·06$ بنسبة الوحدة

المحول *A* :

له مفاعلة تسربية / طور لكل ملف مقدارها 0·04 بنسبة الوحدة

المحول *B* :

له مفاعلة تسربية / طور لكل ملف مقدارها 0·05 بنسبة الوحدة. أما خط النقل فيمتلك محاثة تتابع صفري تعادل 3·5 مرة بقدر محاثة التتابع الموجب .

(الجواب : 124 ك. ف) .

4. أحسب معدل ارتفاع الفولتية بالنسبة الى الارض والذي يمكن ان يحدث على خط علوي معلق ثلاثي الطور فولتيته 66 ك . ف له موصلات مقطعها العرضي 1·6 سم^2 . بمعدل تباعد هندسي بين هذه الموصلات مقداره 1·2 متر بسبب قصم تيار بقيمة 15 أمبير في كل الاطوار .
ناقش الاهمية التي تكمن في مقدار ارتفاع الفولتية المحسوب عندما يقارن مع ذلك الذي أعطي في الفقرة 2.9 لقصم تيار مغنطة لمحول . علق على الافتراضات المعمولة في الحسابات .

5. اذا حدث عطل قصر الدائرة على بعد 0·935 كم من قاطع دورة على متن خط ناقل له محاثة 1·25 ملي هنري/كم ومتسعة 0·01 ميكروفارد / كم .

فجد التردد الطبيعي لجهة الخط ووضح : بأي عامل تزيد هذه القيمة عن القيمة التي يحصل عليها باعتبار محاثة الخط ومتسعته متضامنين .

(جامعة ليدز) (الجـواب : 29·4 كيلو هرتز) .

6 .وحدة مولد / محول قدرتها 200 MVA, . وممانعتها 0·45 بنسبة الوحدة ، ربطت الى خط نقل 275 ك.ف طوله 8·7 كيلومتر وله ممانعة تمور مقدارها 400 أوم ومتسعة 0·075 ميكروفراد . قد ربط هذا الخط خلال قاطع دورة الى خط ثان طوله 174 ممانعة التمور له مقدارها 400 أوم ومتسعته 1·5 ميكروفراد . بعد ان تم لقاطع الدورة قصم تيار الشحن للخط الثاني . حدث اعادة اشعال لفجوة القاطع عندما وصلت الفولتية عبره قيمتها القصوى.

احسب ، بملاحظة اي فرض يدخل في الحساب ،

(أ) الازمان اللازمة لانتقال تمور على طول كل خط من الخطين .
(ب) مقدار وفترة تيار التمور الذي يمر في القاطع اضافة الى التيار المتذبذب ؛
(ج) قيمة الذروة والتردد للتيار المتذبـذب .

ارسم تمورات الفولتية والتيار عند لحظة او لحظتين تتبعان اعادة الاشعال بفترة قصيرة . ارسم ايضاً شكل الموجة لتيار نصف الدورة الاولى المار في قاطع الدورة بعد عملية اعادة الاشعال . وعلق على الفولتيات المفرطة التي قد يسببها .
(جامعـة ليدز) (الجواب : 30 ميكروثانية . 600 ميكروثانية . 60 ميكروثانية . 560 أمبير 617 أمبير . 142·5 هرتز) .

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفصل الثالث

الاستقرارية العابرة لمنظومات القدرة

TRANSIENT STABILITY OF POWER SYSTEMS

3.1 مقدمة

تم التطرق الى نظرية المولد المتزامن (المنوب) ، وبصورة رئيسية الى اشتغاله في الحالة المستقرة ، في الفصل 7 من الجزء 1 . النقاط الرئيسية ذات العلاقة بدراستنا الحالية ستلخص في الفقرة 3.2.1 . وفي الفصل الحالي سنتبصر في الظروف الضرورية لاشتغال ناجح لمنظومة القدرة عند الانتقال من ظروف اشتغال حالة مستقرة معينة الى اخرى نتيجة للتغيرات في ظروف تشغيلها . التغيرات يمكن ان تصنف اما الى صغيرة وبطيئة اوالى كبيرة ومفاجئة حيث ان البطيء يعني زمناً طويلا مقارنة بثوابت الزمن لدوائر المجال للمكائن ومنظمات الفولتية الذاتية ومتحكمات التوربينات . (أنظر الفقرات 7.5 و 7.9 و 7.10 من الجزء 1) .

تكون لمنظومة القدرة المتزامنة استقرارية حالة مستقرة اذا أستطاعت استعادة السرعة المتزامنة والمحافظة عليها بعد حصول اضطراب صغير وبطيء . الاضطراب المتغير والبطيء يعني تقلبات الحمل الاعتيادي وبضمنه تأثيرات منظمات الفولتية الذاتية ومتحكمات التوربينات . وتكون لمنظومة القدرة استقرارية عابرة اذا استطاعت استعادة السرعة المتزامنة والمحافظة عليها بعد أضطراب كبير مفاجيء . الاضطراب الكبير المفاجيء هو ذلك الاضطراب الذي تسببه الاعطال أو الاقلدة (switching) . لغرض تكوين المباديء الاساسية فقد فرض ان منظمات الفولتية الذاتية ومتحكمات التوربينات بطيئة جداً بحيث انها سوف لاتكون ذات تأثير خلال فترة التحليلات . الاستقرارية الديناميكية تشير الى حالة الاستقرارية العابرة عندما تكون المنظمات والمتحكمات سريعة — الاشتغال وتؤخذ في الاعتبار في التحليلات . ان حد الاستقرارية لمنظومة ماهو القدرة القصوى (للحالة

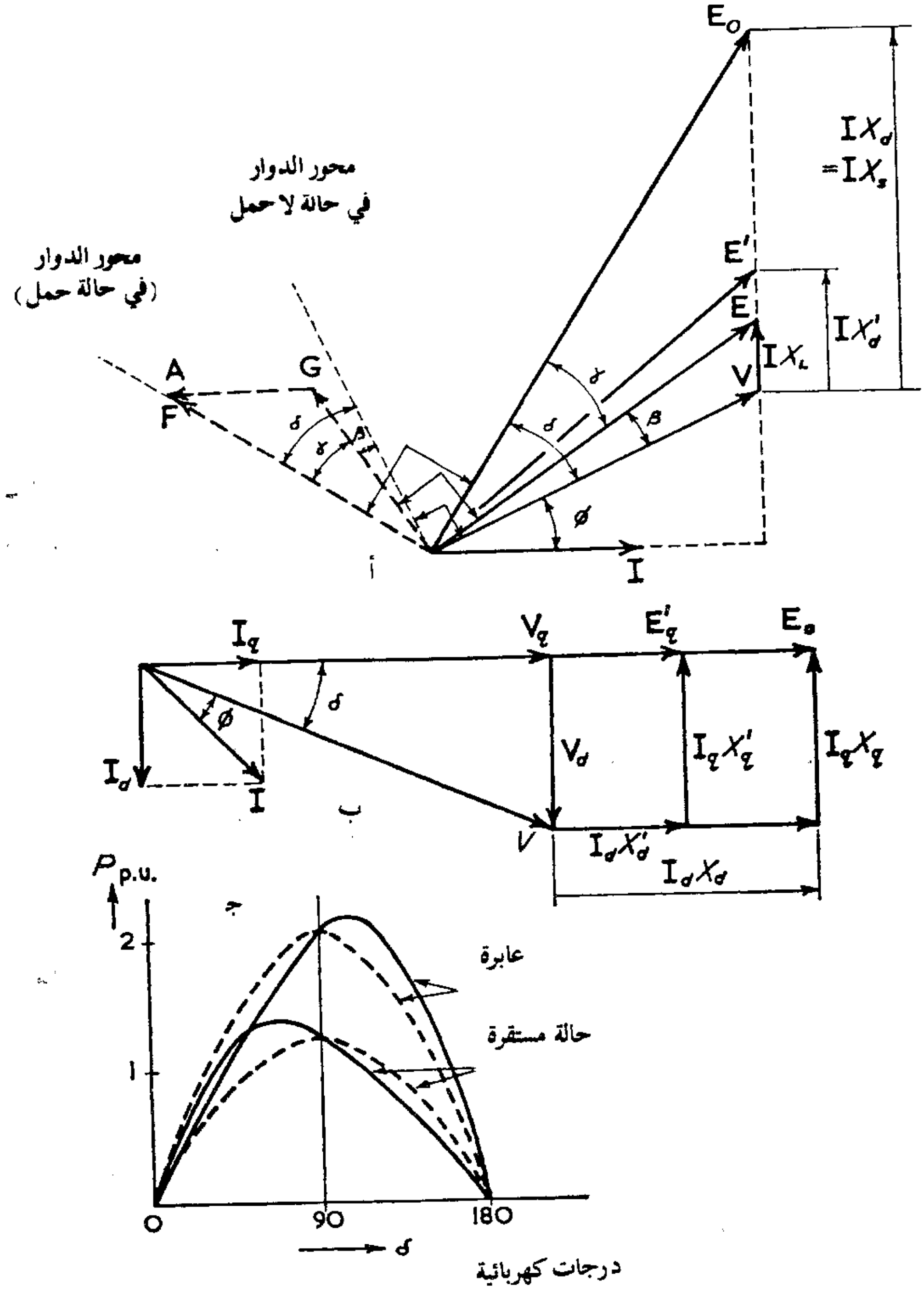
المستقرة) التي يمكن ان تنتقل خلال المنظومة بدون فقدان الاستقرارية . ويعتمد الحد كذلك على مقدار ونوع وموضع الاضطراب. اما عامل الاستقرارية فهو نسبة حد الاستقرارية الى انتقال قدرة – الحمل الفعلية .

سنبين لاحقا (الفقرة 3.4.2) ان كل المكائن في منطقة تصدير القدرة يمكن ان تبسط الى مولد مكافيء (G) ، وبشكل مشابه ، فان كل المكائن في منطقة استلام القدرة يمكن ان تبسط الى محرك متزامن مكافيء (M) ومنظومة النقل (منظومة شبكة الـ 400 كيلوفولت في المملكة المتحدة) التي تربط هاتين المنطقتين تدعى بالمغذي الرابط (او الخط – الرابط). منظومة الماكنتين اعلاه يمكن ان تبسط الى ماكنة واحدة مربوطة الى منظومة قضيب توزيع لانهائي ذات فولتية ثابتة وتردد ثابت . بصورة عامة في هذا الفصل ، سنهمل المقاومة نسبة الى المفاعلة الحثية للمنظومة .

3.2 انتقال القدرة : مفاعلة الانتقال Power transfer: transfer reactance

3.2.1 المولد المتزامن SYNCHRONOUS GENERATOR

يبين الشكل 3.1 (أ) المخطط المشترك للمتجه والطور لمولد متزامن ذي دوار اسطواني لهذا المولد لانميز بين كميات المحور – المباشر (d) والمحور المتعامد (q) خلال اشتغال الحالة المستقرة . وتمثل F القوة الدافعة مغناطيسيا (ق . د . مغ) المثارة بالتيار المستمر التي ستولد $\mathbf{E}_o$ في حالة الدائرة المفتوحة . وفي حالة الحمل سيحور رد فعل المنتج (المساوي والمعاكس لـ A) الـ ق . د . مغ . المؤثرة الى الـ ق . د . مغ . النهائية G التي ستنشيء فيض الفجوة الهوائية والذي بدوره سيولد E التي هي الـ ق . د . ك . خلف مفاعلة تسرب الساكن (المنتج) X_L (او X_a كما في B.S. 4296) بحيث ان $\mathbf{E} = \mathbf{V}+\mathrm{j}\mathbf{I}X_L$. واذا أهملنا تأثيرات التشبع فان رد فعل المنتج سيتناسب مع تيار الحمل والمثلثات المحاطة بوساطة F و G وبوساطة $\mathbf{E}_o$ و E ستكون متشابهة . المفاعلة المتزامنة X_d (او X_S) تجمع تأثيرات مفاعلة تسرب الساكن ورد فعل المنتج وستكون ثابتة بحيث ان $\mathbf{E}_o = \mathbf{V}+\mathrm{j}\mathbf{I}X_d$. و $\mathbf{E}_o$ خلف X_d تستعمل نموذجاً (دائرة مكافئة) لتحليلات منظومة القدرة في الحالة المستقرة .



شكل 3.1 مخططات المولد المتزامن
(أ) دوار اسطواني
(ب) نوع القطب البارز
(ج) منحنيات القدرة / الزاوية لدوار اسطواني
(الخط المنقط) وقطب بارز (الخطوط المصمتة)

اذا كان المولد عند الحمل المقنن اوقربه فان تأثيرات التشبع لايمكن اهمالها عـادة وبما ان تأثيررد فعل المنتج على حديد مشبع سيقل فان X_d ستبدل بقيمة اقل وهي المفاعلة المتزامنة المؤثرة X_{eq} (انظر B.S. 2658) التي تؤخذ على انها المفاعلة المتزامنة للمولد غير المشبع المكافيء . طريقة حساب X_{eq} تشتمل على تحديد مفاعلة بوتير (Potier) X_p من فحص عامل القدرة الصفري والتيار المقنن . مفاعلةبوتير هي . نمط من مفاعلة تسرب الساكن التي تأخذ بنظر الاعتبار التسرب الزائد في ملفات المجال عندما يكون المولد في حالة حمل .

يمكننا أن نلاحظ من شكل 3.1 (أ) أن مطاورات الق . د . ك . تتغير جيبيا مع الزمن عند تردد المصدر بينما تدور المتجهات بسرعة تزامنية في الفراغ . تراكب المطاورات والمتجهات على المخطط نفسه والتوجيه الخاص بينهما الذي يعطينا انفصالاً مقداره°90بين الـق . د . مغ والـ ق . د . ك المناظرة لها هو عرف اصطلاحي وملائم ولكن ليس له أهمية فيزياوية .

تبصر الان في مولد محمل تعرض الى تغيرمفاجيء في الحمل أوالى عطل خارجي . لقد بينا في الفقرة 7.5 من الجزء 1 أن المفاعلة الظاهرية للمولد التي تزداد من القيمة دون العابرة X''_d (تكون عادة أكثربقليل من X_L) عند لحظة التغيير عبرالقيمة العابرة X'_d الى X_d خلال ظروف الحالة المستقرة . والحالة دون العابرة تكون نتيجة للتيارات المحتثة في سطح حديد الدوار والتي تضمحل بسرعة جداً (على أفتراض أنـه لاتوجـد ملفـات اخماد) . والحالة العابرة تكون نتيجة للتيارات المحتثة في ملف المجال . هذه التيارات المحتثة تؤخرتأثيررد فعل المنتج حسب النظرية القائلة بأن ترابط الفيض لدائرتين متقارنتين متبادلتين لايمكن أن يتغير لحظياً . القوى الدافعة الكهربائية دون العابرة والعابرة والمتزامنة المناظرة خلف المفاعلات المناظرة تكونE''وE'و E_o . شكل 3.1 (أ) لايبين ظرف الحالة دون العابرة لأنها ليست ذات فائدة في مضمار الاستقرارية . ويجب أن يلاحظ أن زاوية الحمل هي دائما الزاوية بين $\mathbf{E}_o$ و $\mathbf{V}$ ، بغض النظرعن دائرة الـق . د . ك . خلف المفاعلة المستعملة ، وهي الزاوية التي أنتقل خلالها الدوار من موضعه في حالة اللاحمل الى موضعه في حالة الحمل .

ان صافي القدرة الميكانيكية من التوربين ، بعد تجهيزكل المفاقيد عدا الفقدان I^2R للمولد ، يساوي القدرة الداخلة للمولد / طور P_1 حيث أن (على أفتراض أن $R \neq 0$)

$$P_1 = \text{الجزء الحقيقي من } \mathbf{E}_o\mathbf{I}^*$$

$$= \frac{E_o^2}{Z_s}\cos\theta - \frac{VE_o}{Z_s}\cos(\theta+\delta) \qquad [3.1a]$$

حيث أن θ = زاوية الممانعة للمولد = $\tan^{-1}(X_d/R)$ و

Z_s = الممانعة التزامنية / طور = $|R+jX_d|$

والقدرة الخارجة من المولد P_2 المنتقلة الى قضيب التوزيع اللانهائي هي الجزء الحقيقي من $P_2 = \mathbf{VI}^*$

$$= \frac{VE_o}{Z_s}\cos(\theta-\delta) - \frac{V^2}{Z_s}\cos\theta \qquad [3.1b]$$

وعندما $R = 0$ فان القدرة / طور تكون

$$P = P_1 = P_2 = \frac{VE_o}{X_d}\sin\delta \qquad [3.1c]$$

وهذه النتيجة يمكن الحصول عليها من شكل 3.1 بملاحظة أن $IX_d\cos\phi = E_o\sin\delta$. اذا كانت δ هي المتغير المستقل الوحيد فان القدرة الخارجة ستكون صفراً عندما $\delta = 0$ وتأخذ قيمتها العظمى عندما $\delta = 90°$ (أو بصورة أعم عندما $\theta = \delta$). تحميل الحالة المستقرة للمولد تمت مناقشته في الفقرة 7.7 من الجزء 1 . ان القدرة القصوى هي VE_o/X_d وهي حد الأستقرارية للحالة المستقرة .

بما أن δ هي الزاوية بين موقع قطب الدوار في حالة الحمل وموقعه في حالة اللاحمل فان $\delta = 0$ عند مزامنة المولد أولاً (بشكل طافٍ) على قضيب التوزيع اللانهائي . عند زيادة تجهيز البخار الى توربين المولد بحيث أن السرعة الكهربائية للمولد ω كانت أكبر من السرعة المتزامنة ω_s مؤقتاً تكون

$$\delta = (\omega-\omega_s)t$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega-\omega_s$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \qquad [3.2]$$

وهكذا فان التعجيل النسبي والمطلق يكونان متساويين والسرعة الزاوية . في نطاق هذا الفصل . ستعني السرعة نسبة الى السرعة المتزامنة لقضيب التوزيع اللانهائي .

قــدرة التزامـــن

لنفترض أن المولد يشتغل تحت ظروف الحالة المستقرة وكما مبين في شكل 3.1 وأن زاوية الحمل قد ازدادت بكمية قليلة $\Delta\delta$. الزيادة في القدرة المتزامنة الخارجة ستكون كما يلي

$$\Delta P = \frac{dP}{d\delta}(\Delta\delta) = P_r(\Delta\delta) \qquad [3.3a]$$

حيث ان

$$P_r = \frac{VE_o}{X_d}\cos\delta \qquad [3.3b]$$

وتدعى بمعامل قدرة التزامن . ومادامت $P_r > 0$ أي أنه $0 \leqq \delta < 90°$ فان الزيادة في زاوية الحمل δ ستسبب زيادة في القدرة الخارجة . هذه القدرة يجب أن تؤخذ حركياً من الدوار (بما أن متحكم التوربين لم يتبدل) وبذلك فان المولد سيتباطأ . وبذلك فان المولد التزامني أصلاً يقاوم أي محاولة لتغير δ عن القيمة المناظرة لظرف الحالة المستقرة . هذا ليس صحيحاً اذا كانت $\delta \geqq 90°$.

مولـــد ذو قطـــب بارز

معادلة القدرة / زاوية الحمل لمولد ذي قطب بارز ذي مقاومة مهملة تم اشتقاقها في الجزء 1 الفقرة 7.10 وهي

$$P = \frac{VE_o}{X_d}\sin\delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_dX_q}\sin 2\delta \qquad [3.4a]$$

هذه المعادلة تم رسمها في شكل 7.19 . يجب أن يلاحظ أن المولد ذا القطب البارز يكون « أكثر ثبوتاً » من المولد ذي الدوار الأسطواني لأن السابق يشتغل بزاوية حمل أقل لحمل معين . معامل القدرة التزامنية هو

$$P_r = \frac{VE_o}{X_d}\cos\delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{X_d X_q}\cos 2\delta \qquad [3.4b]$$

القيمة القصوى للقدرة P تحدث عندما $P_r = 0$ وهذا ستكون $\delta < 90°$

تحليــلات الحالــة العابــرة لمولد ذي قطب بارز

التحليلات العابرة لمولد متزامن ذي قطب بارز محمل له مقاومة ساكن مهملة خلال فترة قصيرة من الزمن ($(< T_d')$) تاليه لحدوث تغير في ظروف الأشتغال تكون أقل تعقيداً بدلالة مركبات المحاور المباشرة والمتعامدة الخيالية للتيار منها بدلالة تيارات طور الساكن الفعلية . والفقرة 7.7 من هذا الكتاب ستناقش (بمساواةردود فعل المنتج المؤثرة) تحويل تيارات الطور اللحظية (المتغيرة مع الزمن) i_a و i_b و i_c الى i_d و i_q التي لاتتغير مع الزمن (الا خلال الظروف العابرة).والتي تجري في ملفات خيالية مثبتة في موضع نسبي الى الدوار . تفاصيل هذه النظرية معطاة في الكتب المنهجية مثل Fitzgerald and Kingsley . وما يلي ليس أكثر من تلخيص للأجزاء ذات العلاقة بتحليلات الأستقرارية العابرة .

كل الكميات تكون بصيغة نسبة الوحدة وكل كميات الساكن تكون (عادة) على أساس مقنن المولد . الكميات الأساس للملفات الأخرى (ملفات محاور d و q، ملفات المجال والأخماد) تقرر بعد ذلك حسب نظرية المحول (انظر الجزء I ، فصل 6) . العلامة المقترحة الآن للمفاعلة بنسبة الوحدة (بموجب المواصفات القياسية البريطانية B.S. 4296) هي x) بينما X تشير الى المفاعلة بالأوم . قيم i_d و i_q بنسبة الوحدة تكون مساوية للقيم بنسبة الوحدة لـ I_d و I_q والتي هي مركبات طورية لتيار الساكن I كما مبين في شكل 3.1 (جـ) . واذا كانت التيارات بالأمبير فان $i_d = \sqrt{2}I_d$ و $i_q = \sqrt{2}I_q$.

نظرية الحالة العابرة للمولد المتزامن تفترض نظرية ترابط الفيض الثابت – أي أنه نتيجة للمحاثة فان ترابط الفيض يبقى ثابتاً لزمن قصير بعد تغير مفاجيء في ظروف التشغيل . من الشكل 3.1 (ب) يمكننا أن نكتب المعادلة التالية

$$\mathbf{E}'_q = \mathbf{V}_q + \mathbf{I}_d \mathbf{X}'_d = \mathbf{V} \cos \delta + \mathbf{I}_d \mathbf{X}'_d \qquad [3.4c]$$

ويمكن ان نثبت ان E'_q تتناسب مع ترابط فيض المجـــال الـكلي وبذلك يمكن ان نفترضه ثابتا على مدى الفترة العابرة (كتاب Fitzgerald and Kingsley ، الفقرة 5.9) . القدرة الخارجة من مولد محمل خلال المرحلة العابرة يمكن ان تعطى بالمعادلة

$$P = VI \cos \phi = V_d I_d + V_q I_q$$

(انظر الجزء1 فقرة الملحق) . وبالتعويض من المعادلة [3.4c] وباستعمال $V_d = V\ \delta = I_q X_q$ نحصل على

$$P = \frac{E'_q V \sin \delta}{X'_d} - \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q}\right) \sin 2\delta \qquad [3.4d]$$

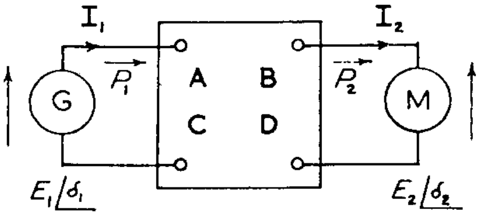
هذه المعادلة مشابهة للمعادلة [3.4a] (التي تعطينا القدرة الخارجةللحالةالمستقرة) ولـكن تم ابدال E_o بـ E'_q مع ابدال X'_d بـ X_d . وبما ان $E'_q/X'_d > E_o/X_d$ فان القدرة القصوى تكون اعظم خلال الظرف العابرمنها خلال الحالة المستقرة . لاحظ كذلك ان الحد الثاني قد عكست اشارته لان $X_d > X_q > X'_d$ بصورة عامة . اذا افترضنا انه لايوجد ملف مجال على المحور المتعامد فعندئذ $X'_q = X_q$. هذا ليس صحيحا اذا استعملنا دورا ذا ملف مقسم (انظر الفصل 9) . شكل 3.1 (ج) يبين منحنيات القدرة / الزاوية للحالتين المستقرة والعابرة لمولد ذي قطب بارزمحمل . عند ربط مولد الى قضيب توزيع لانهائي فان اضافة مفاعلة المغذي الرابط الثابتة الى مفاعلات المولد المختلفة سيمحي الاختلاف بين منحنيي القدرة / الزاوية .

التقريب الاول في تحليلات الاستقرارية العابرة هو ان يهمل تاثير القطب البارز في الحالة العابرة عادة ، عن طريق حذف الحد الثاني في [3.4d] ولذلك فان منحني القدرة / الزاوية يصبح جيبيا . من الملاحظ ان هذا التقريب يكون مبررا اكثرعندالتبصر في القدرة القصوى منه لقيم صغيرة للزاوية δ حيث ان الحد الثاني قد يكون في الحقيقة ذا رتبة مساوية للحد الاول – ولتبسيط اكثر يمكننا ان نستعمل E' بوصفها ق . د . ك خلف المفاعلة العابرة X'_d بدلا من E'_q . المواصفات القياسية البريطانية B.S. 4296 تعرف كل معالم الماكنة الضرورية لتحليلات الماكنة المتزامنة وتعطي كذلك طرق الفحص المستعملة لتحديد هذه القيم .

3.2.2 الحالة العامة لشبكة ثنائية المنفذ ، ذات اربع نهايات

GENERAL CASE OF THE 2-PORT, 4-TERMINAL NETWORK

اذا كان من الممكن معاملة المغذي الرابط بوصفه خطا قصيرا فان مفاعلته يمكن ان تضاف الى مفاعلة المولد وعندئذ يمكن استعمال الصيغة الرياضية اعلاه نفسها . من الواضح ان تغيرات مفاعلة المنوب مع الزمن ، من دون العابرة.خلال العابرة الى الحالة المتزامنة . تصبح ذات اهمية اقل كلما ازدادت مفاعلة الخط .



شكل 3.2 منظومة قدرة تم تصغيرها الى شبكة ثنائية المنفذ ذات اربع نهايات

شكل 3.2 يبين منظومة القدرة المصغرة الى شبكة ثنائية المنفذ . G هو المولد المكافيء الممثل لمنطقة تصدير القدرة و M هو المحرك المكافيء الممثل لمنطقة استلام القدرة (او قضيب التوزيع اللانهائي) . مصفوفة الانتقال الـكلية

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

يمكن الحصول عليها بضرب مصفوفات الانتقال للمولد G والمحرك M والمغذي الرابط : انظر الجزء 1 الفقرة والملحق م.1 من هذا الجزء . معادلات الشبكة الثنائية المنفذ هي (انظر الفقرة 1.4 من الجزء 1)

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{A}\mathbf{E}_2 + \mathbf{B}\mathbf{I}_2 \qquad [3.5a]$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{C}\mathbf{E}_2 + \mathbf{D}\mathbf{I}_2 \qquad [3.5b]$$

$$P_1 = \text{real part of } \mathbf{E}_1\mathbf{I}_1^*$$

$$= (DE_1^2/B)\cos(\beta - \Delta) - (E_1E_2/B)\cos(\beta + \delta) \qquad [3.5c]$$

$$P_2 = \text{real part of } \mathbf{E}_2\mathbf{I}_2^*$$

$$= (E_1E_2/B)\cos(\beta - \delta) - (AE_2^2/B)\cos(\beta - \alpha) \qquad [3.5d]$$

حيث ان $\mathbf{A} = A\underline{/\alpha}$ و $\mathbf{B} = B\underline{/\beta}$ و $\mathbf{D} = D\underline{/\Delta}$ وزاوية الحمل الكلية لمنظومة القدرة هي $\delta = \delta_1 - \delta_2$ اذا كانت δ هي المتغير المستقل الوحيد فعندئذ تاخذ قيمتها القصوى عندما $\delta = \beta$. على الطالب ان يبين انه لمنظومة قدرة عديمة الفقد (والتي تدل على عدم وجود احمال متوازية على المغذي الرابط) A تكون حقيقية لذلك فان $\alpha = 0$ و B هي مفاعلة حثية نقية وذات $\beta = 90°$ (تبصر في شبكة T المكافئة) . وهكذا فكلتا المعادلتين [3.5c و 3.5 d] تبسطان الى

$$P = P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{B} \sin \delta \qquad [3.6]$$

B تدعى مفاعلة انتقال دائرة قصيرة نظرا لان $\mathbf{B} = \mathbf{E}_1/\mathbf{I}_2$ عندما $\mathbf{E}_2 = 0$.

طريقة تحليلات التيار الشبيكية ستناقش في الفقرة 8.2 باستعمال طرق المصفوفات . عن طريق التباين . فسنناقش الان استعمال المحددات . بالاشارة الى المعادلة [8.2] يمكننا ان نلاحظ ان الممانعة الذاتية الشبيكية للشبيكة n هي $\mathbf{Z}_{nn}$ وتعادل حاصل جمع ممانعات الفروع حول الشبيكة n وتكون موجبة دائما : اي ان الممانعة التبادلية $\mathbf{Z}_{nm}$ بين الشبيكات n و m هي ممانعة الفرع الحامل لكلا تياري الشبيكة $\mathbf{I}_n$ و $\mathbf{I}_m$ وتكون موجبة اذا كانت تحمل كلا تياري الشبيكة بالاتجاه نفسه : وان $\mathbf{E}_n$ هي الق . د . ك . المحصلة العاملة حول الشبيكة n وتكون موجبة اذا كانت « تولد » $\mathbf{I}_n$. الاتجاه التقليدي هو تدوير التيارات باتجاه عقرب الساعة دائما ولذلك فبصورة عامة تكون الممانعات التبادلية سالبة . واذا استعملنا الرمز السفلي للاشارة الى المنفذ الخارج وبالاشارة الى المعادلة [8.2] نستطيع كتابة المصفوفة التالية

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{E}_1 & -\mathbf{Z}_{13} \\ -\mathbf{Z}_{21} & -\mathbf{E}_2 & -\mathbf{Z}_{23} \\ -\mathbf{Z}_{31} & 0 & \mathbf{Z}_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \mathbf{Z}_{11} & -\mathbf{Z}_{12} & -\mathbf{Z}_{13} \\ -\mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} & -\mathbf{Z}_{23} \\ -\mathbf{Z}_{31} & -\mathbf{Z}_{32} & \mathbf{Z}_{33} \end{vmatrix}} .$$

$$= \frac{\mathbf{E}_1 \Delta_{12}}{\Delta} - \frac{\mathbf{E}_2 \Delta_{22}}{\Delta} \qquad [3.7a]$$

حيث ان Δ هي قيمة محدد عناصر الممانعة و Δ_{mn} هي العامل القرين (انظر الملحق م 1.9) لعنصر الممانعة $\mathbf{Z}_{mn}$. المعادلة [3.7a] يمكن اعادة كتابتها كما يلي :

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{z}_{21}} - \frac{\mathbf{E}_2}{\mathbf{z}_{22}} \qquad [3.7b]$$

حيث ان $\mathbf{z}_{21} = \Delta/\Delta_{12}$ وهي ممانعة أنتقال دائرة قصيرة بين الشبيكتين 1 و 2. بما ان $\mathbf{z}_{21} = \mathbf{E}_1/\mathbf{I}_2$ عندما $\mathbf{E}_2 = 0$ و $\mathbf{z}_{22} = \Delta/\Delta_{22}$ هي ممانعة دخل دائرة قصيرة للشبيكة2 بما ان $\mathbf{z}_{22} = -\mathbf{E}_2/\mathbf{I}_2$ عندما $\mathbf{E}_1 = 0$: الأشارة السالبة تكون نتيجة لأختبار القطبيات النسبية لـ $\mathbf{E}_2$ و $\mathbf{I}_2$.

مثالاً على ذلك تبصر في منظومة القدرة المبسطة الى شبكة T المكافئة المبينة في شكل 3.3 (أ) . اذن

$$(\mathbf{z}_a+\mathbf{z}_c)\mathbf{I}_1-(\mathbf{z}_c)\mathbf{I}_2 = \mathbf{E}_1$$

$$-(\mathbf{z}_c)\mathbf{I}_1+(\mathbf{z}_b+\mathbf{z}_c)\mathbf{I}_2 = -\mathbf{E}_2$$

$$\Delta = \begin{vmatrix}(\mathbf{z}_a+\mathbf{z}_c) & (-\mathbf{z}_c)\\ (-\mathbf{z}_c) & (\mathbf{z}_b+\mathbf{z}_c)\end{vmatrix}$$

$$= \mathbf{z}_a\mathbf{z}_b+\mathbf{z}_b\mathbf{z}_c+\mathbf{z}_c\mathbf{z}_a$$

$$\Delta_{12} = (-1)^3(-\mathbf{z}_c) = \mathbf{z}_c$$

$$\Delta_{22} = (-1)^4(\mathbf{z}_a+\mathbf{z}_c) = \mathbf{z}_a+\mathbf{z}_c$$

$$\mathbf{z}_{21} = (\mathbf{z}_a\mathbf{z}_b+\mathbf{z}_b\mathbf{z}_c+\mathbf{z}_c\mathbf{z}_a)/\mathbf{z}_c$$

$$\mathbf{z}_{22} = \mathbf{z}_b+(\mathbf{z}_a\mathbf{z}_c/(\mathbf{z}_a+\mathbf{z}_c))$$

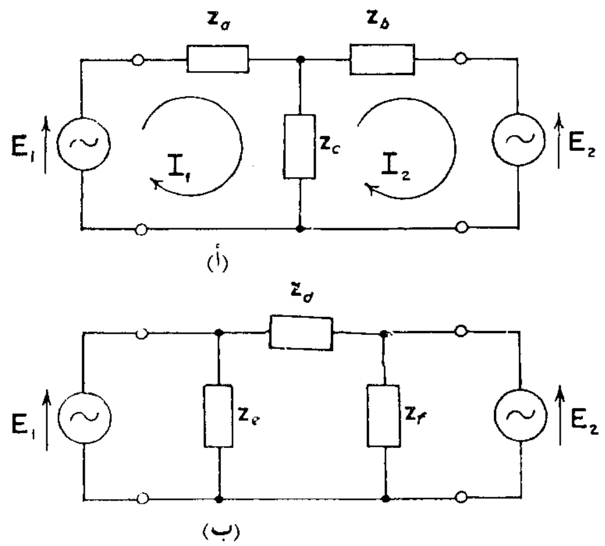
من الواضح ان $\mathbf{z}_{22}$ هي ممانعة الدخل عند المنفذ 2 عندما تكون $\mathbf{E}_1$ مقصورة الدائرة . وبتطبيق تحويلة نجمي–مثلثي سنحصل على دائرة Π المكافئة المبينة في شكل 3.3 (ب) ,حيث ان $\mathbf{z}_d = \mathbf{z}_{21}$. اهمية $\mathbf{z}_{21}$ بوصفها ممانعة أنتقال بين المنفذين 1 و 2 تكون ظاهرة : فهي الممانعة المكافئة المفردة التي تربط مصدري الـ ق.د.ك. مباشرة . ومن الواضح أنه بتبادل الرمزين السفليين a و b تكون $\mathbf{z}_{12} = \mathbf{z}_{21}$ (شبكة ثنائية الأتجاه) .

اذا كانت $\mathbf{E}_1= E_1/\delta_1$, $\mathbf{E}_2= E_2/\underline{\delta_2}$, $\delta = \delta_1-\delta_2$, $\mathbf{z}_{11}= z_{11}/\underline{\theta_{11}}$, $\mathbf{z}_{12}=z_{12}/\underline{\theta_{12}}$ و $\mathbf{z}_{22} = z_{22}/\underline{\theta_{22}}$ فعندئذ

$$P_1 = \text{الجزء الحقيقي من } \mathbf{E}_1\mathbf{I}_1^*$$
$$= (E_1^2/z_{11})\cos\theta_{11}-(E_1E_2/z_{12})\cos(\theta_{12}+\delta) \qquad [3.8a]$$

$$P_2 = \text{الجزء الحقيقي من } \mathbf{E}_2\mathbf{I}_2^*$$
$$= (E_1E_2/z_{12})\cos(\theta_{12}-\delta)-(E_2^2/z_{22})\cos\theta_{22} \qquad [3.8b]$$

$$P_1 = P_2 = P = \frac{E_1E_2}{X_{12}}\sin\delta \qquad [3.9]$$



شكل 3.3 (أ) دائرة T المكافئة و (ب) دائرة π المكافئة لمنظومة قدرة .

كل معادلات القدرة المتزامنة [3.1c] و [3.6] و [3.9] لها النمط نفسه ولذلك فللتعميم يمكن كتابة المعادلة كما يلي :

$$P = P_m \sin \delta \qquad [3.10a]$$

لمنظومة قدرة عديمة الفقد تكون زوايا الممانعات كلها °90 وبذلك حيث ان

$$P_m = \frac{E_1 E_2}{X} \qquad [3.10b]$$

وهي حد الأستقرارية للحالة المستقرة و X هي مفاعلة الأنتقال .

مفاعلــة الانتقال خلال العطــل :

لقد تمت مناقشة حسابات العطل في الجزء 1 . ففي الفصل 7 الفقرة 7.7 . بينا بوساطة الأمثلة المحلولة كيفية حساب تيارات العطل خلال عطل ثلاثي الطور على منظومة قدرة محملة باستعمال نظرية ثفنن بينما في الفصل الثامن الفقرة 8.4. تم التعامل بصورة مشابهة مع الأعطال غير المتماثلة . في حسابات العطل نفترض عادة ان كل مصادر الـ ق . د . ك في منظومة القدرة متساوية (بنسبة الوحدة) ومنطبقة الطور . وهذا التبسيط سوف لايكون صحيحاً في دراسات الأستقرارية لأن القوى الدافعة الكهربائية للمولد المكافيء (E_1) وللمحرك المكافيء أوقضيب التوزيع اللانهائي (E_2)

ليست بالضرورة متساوية وتكون مزاحة بعضها عن بعض بزاوية حمل γ والتي تكون متغيرة. هذه القوى الدافعة الكهربائية قد تم الفرض بانها متماثلة ولذلك فهي تتألف من مركبات التتابع الموجب كلياً. شبكات التتابع الموجب والسالب والصفري تربط فيما بينها طبقاً لنوع العطل والشبكة الكاملة تبسط الى شبكة مثلثية مكافئة. ومفاعلة الأنتقال هي تلك التي تربط بين مصدري القوة الدافعة الكهربائية مباشرة (أي z_a في شكل 3.3). بدلاً من ذلك يمكننا ان نستعمل المعادلة [3.7b] .

مثـــال محلـــول 3.1 :

مغذٍ رابط ثلاثي الطور132كيلو فولت يربط مجموعة مولد-محول الى قضيب توزيـع لانهائي يتألف مـن خطيـن متوازييـن متماثليـن تمامـاً كـل منهمـا لـه $X_1 = X_2 = X_0/2 = j0{\cdot}5$ p.u. لـلمـولـد - المـحـولـ $E' = 1{\cdot}2$ p.u. و $X_1' = j0{\cdot}2$ p.u. و $X_1' = X_2 = 4X_0$. فولتية قضيب التوزيع اللانهائي هي- 1.0 بنسبة الوحدة وكل القيم التي بنسبة الوحدة هي على الأساس نفسه. احسب مفاعلة الأنتقال وحد قدرة الحالة المستقرة خلال عطل دائرة قصيرة عند نقطة منتصف أحد الخطين. كلتا نقطتي التفرع لطرف الفولتية العالية للمحول ولقضيب التوزيع اللانهائي مؤرضتان مباشرة .

الحل (أنظر الشكل 3.4) :

$= E_1 = E'$ الـق . د . ك . خلف المفاعلة العابرة X_1' .

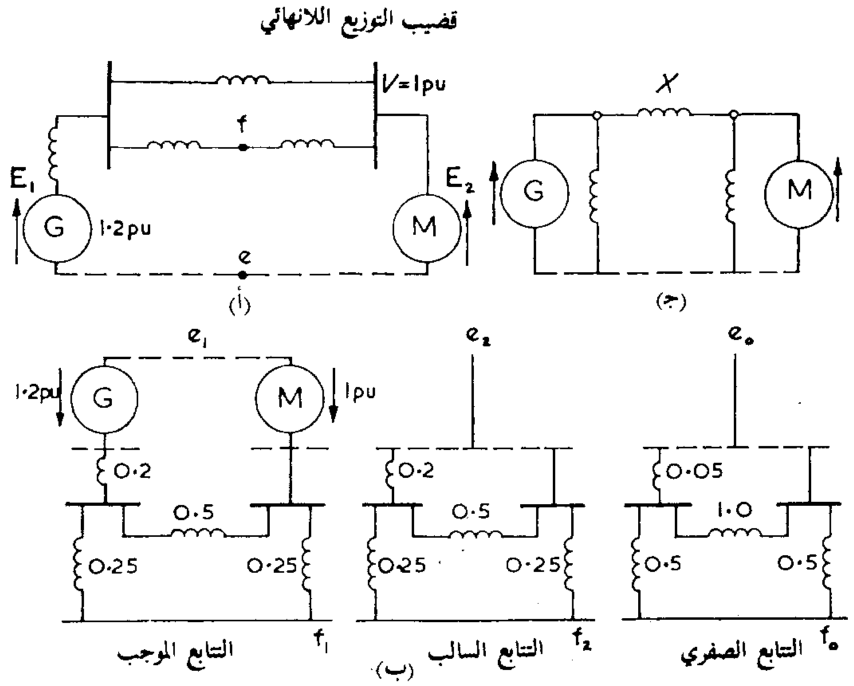
(أ) عطل ثلاثي الطور-اربط f_1 الى e_1 شكل (3.4 ب) وبسط الشبكة الى شبكة مثلثية مكافئة (شكل 3.4 ج) . اذن

$$X = 1{\cdot}1 \text{ p.u. and } P_m = \frac{1{\cdot}2 \times 1}{1{\cdot}1} = 1{\cdot}091 \text{ p.u.}$$

(ب) عطل ارضي على طور واحد-اربط كل شبكات التتابع الثلاث على التوالي . اذن

$$X = 0{\cdot}5352 \text{ p.u. and } P_m = 2{\cdot}242 \text{ p.u.}$$

(ج) عطل طوري عبر طورين-اربط f_1 الى f_2 و e_1 الى e_2 . اذن



شكل 3.4 توضيح حساب مفاعلة الانتقال خلال عطل

$$X = 0{\cdot}6378 \text{ p.u. and } P_m = 1{\cdot}879 \text{ p.u.}$$

(د) عطل ارضي مزدوج على طورين – اربط f_1 الى f_2 الى f_0 و e_1 الى e_2 الى e_0 . اذن

$$X = 0{\cdot}7057 \text{ p.u. and } P_m = 1{\cdot}700 \text{ p.u.}$$

وللظروف السابقة للعطل

$$X = 0{\cdot}2+(0{\cdot}5/2) = 0{\cdot}45 \text{ p.u.}$$

و

$$P_m = 2{\cdot}667 \text{ p.u.}$$

ولظروف مابعد العطل (الخط العاطل تم رفعه من الشبكة)

$$X = 0{\cdot}7 \text{ p.u. and } P_m = 1{\cdot}714 \text{ p.u.}$$

على الطالب ان يرسم منحنيات القدرة / الزاوية لكل هذه الظروف . العطل الثلاثي الطور يسبب اكبر تقليص في القدرة والعطل الارضي يشكل اقل تقليص . لذلك فحين التبصر في الاستقرارية لمنظومة القدرة من المعتاد فرض أسوأ حالة وهي عطل ثلاثي الطور.

3.3 قاعدة المساحة المتساوية للاستقرارية العابرة

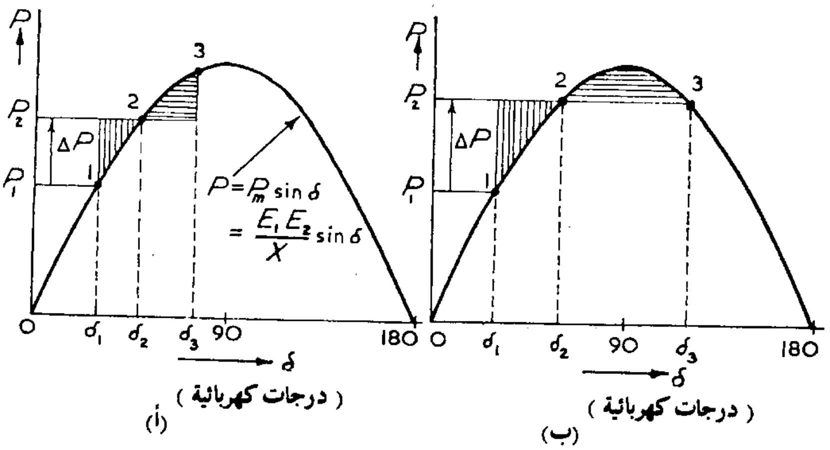
Equal-area criterion for transient stability

اذا كانت حاجة المستهلك للقدرة يمكن ان تفترض لتزداد بمعدل بطيء بحيث ان متحكمات التوربين يمكن ان تزيد القدرة المتولدة بالمعدل نفسه ومنظمات الفولتية الذاتية تستطيع ان تحافظ على فولتيات قضبان التوزيع فانه من الظاهر ان منظومة القدرة يمكن ان تشتغل الى حد الاستقرارية للحالة المستقرة اي ان طلب القدرة سيكون $P_m = E_1E_2/X$ وزاوية الحمل $\delta = 90°$. من الناحية العملية يجب ان تكون قدرة الحمل القصوى اقل من P_m بفرق أمان مناسب : وسيناقش ذلك فيما بعد في الفقرة 3.7 .

سنبين الان كيف ان قدرة الحمل القصوى ستتحدد اكثر بالحاجة الى المحافظة على الاستقرارية العابرة . وستؤخذ بنظر الاعتبار ثلاث حالات لتغيرات كبيرة ومفاجئة في ظروف منظومة القدرة : تغير في الحمل او في مفاعلة الانتقال نتيجة للاقلدة او لعطل تبعته عملية أقلدة لرفع الجزء العاطل .

3.3.1 التغير في الحمل CHANGE IN LOAD

شكل 3.5 يبين علاقة القدرة / الزاوية لمولد مكافيء (ممثلا لمنطقة تصدير القدرة) مربوط الى قضيب توزيع لانهائي . الاحداثي الرأسي يعطي القدرة المتزامنة المنقولة على طول المغذي الرابط لاية زاوية حمل معطاة δ . اذا كانت منظومة القدرة تشتغل تحت ظروف الحالة المستقرة المتمثلة بالنقطة 1 عندما تم رفع حمل موقعي كبير ΔP ضمن منطقة تصدير القدرة وعندئذ اذا افترضنا ان منظمات متحكم القدرة تبقى على وضعها بدون تغيير فان هناك قدرة ميكانيكية داخلة تزيد عن القدرة الكهربائية الخارجة بمقدار يساوي ΔP ابتداء والتي ستعجل دوار المولد التوربيني وتزيد زاوية الحمل δ . فاذا كانت $P_2 = P_1 + \Delta P$ (مساوية للقدرة الميكانيكية الكلية الداخلة مطروحاً منها الجزء الذي لم يتغير من الحمل الكهربائي الموقعي) فان القدرة المعجلة هي



شكل 3.5. (أ) قاعدة المساحة المتساوية لتغير كبير ومفاجيء في الحمل
(ب) الحالة المحددة عند $\delta_3 = 180 - \delta_2$

$$P_a = P_2 - P_m \sin \delta \qquad [3.11]$$

والتي ستقل عن ΔP . عندما $\delta = \delta_1$. الى صفر عندما $\delta = \delta_2$. وخلال الزمن المستغـــرق لتغير زاوية الحمل من δ_1 الى δ_2 فان الدوار قد قام بخزن طاقة حركية . سنبيـــن لاحقاً (أنظر المثال المحلول 3.3) ان التغير في سرعة الدوار نسبة الى السرعة المتزامنة لقضيب التوزيع اللانهائي يمكن اهمالها للتقريب الاولي في التحليلات (على شرط ان تكون الاستقرارية لم تفقد بعد) . وهكذا فان القدرة تتناسب مع العزم و

الطاقة الحركيـة = $\int_{\delta_1}^{\delta_2}$ العزم $d\delta$

$\propto$ $\int$ القدرة $d\delta$

= المساحة المخططة عمودياً في شكل 3.5

عندما يساوي انتقال القدرة P_2 فان $\delta = \delta_2$ ويكون التعجيل صفراً ولكن بما ان للمولـــد الآن سرعة كهربائية تزيد قليلاً عن السرعة المتزامنة فان زاوية الحمل δ ستستمر فـــي الزيادة . وهكذا فان انتقال القدرة سيتجاوز P_2 ويبدأ بالتباطؤ . ويتأرجح الدوار (نسبـــة الى السرعة المتزامنة) حتى تكون زاوية الحمل δ_3 وعند ذاك تكون سرعة الـــدوار مساوية للسرعة المتزامنة . اذا فرضنا (لهذه اللحظة) ان كل المفاقيد (مثلاً المقاومة . اخماد التيارات الدوامية) يمكن اهمالها فان زاوية الحمل δ_3 يمكن اعطاؤها بشرط ان تكـون الطاقة الحركية التي كسبها الدوار عند تأرجحه من δ_1 الى δ_2 مساوية للطاقة

الحركية التي فقدها عند تأرجحه من δ_2 الى δ_3 . وهكذا فان المساحات المظللة في شكل 3.5 تكون متساوية : هذه هي قاعدة المساحة المتساوية للاستقرارية العابرة لمنظومة قدره تبعاً لتغير كبير ومفاجيء في الحمل . اثبات اصولي لهذه القاعدة سيعطى في الفقرة 3.4.3 .

لزاوية حمل δ_3 سيتجاوز انتقال القدرة P_2 ولذلك فان الدوار سيستمر في التباطؤ وتنخفض السرعة الى اقل من السرعة المتزامنة قليلاً وتقل δ . لذلك فان الدوار سيتذبذب بين زاويتي الحمل δ_1 و δ_3 . وستخمد هذه التذبذبات عملياً نتيجة للمفاقيد وسيصل الدوار في النهاية الى ظرف الحالة المستقرة عندما تكون زاوية الحمل δ_2 . مساحة التعجيل يمكن اعطاؤها بالمعادلة التالية :

$$\begin{aligned} A_{acc} &= \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_2 - P_m \sin\delta)\, d\delta \\ &= P_2(\delta_2 - \delta_1) - P_m(\cos\delta_1 - \cos\delta_2) \qquad [3.12a] \end{aligned}$$

ومساحة التباطؤ تكون كما يلي :

$$\begin{aligned} A_{dec} &= \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_m \sin\delta - P_2)\, d\delta \\ &= P_m(\cos\delta_2 - \cos\delta_3) - P_2(\delta_3 - \delta_2) \qquad [3.12b] \end{aligned}$$

وهكذا فان الصيغة الرياضية لقاعدة المساحة المتساوية لحالة تغير الحمل هي

$$\begin{aligned} P_m(\cos\delta_1 - \cos\delta_3) &= P_2(\delta_3 - \delta_1) \\ \cos\delta_1 - \cos\delta_3 &= (\delta_3 - \delta_1)\sin\delta_2 \qquad [3.12c] \end{aligned}$$

حيث ان زوايا الحمل يجب ان تقاس بالزوايا نصف القطرية (النقطرية)

اذا اعطينا δ_1 و δ_2 فان المعادلة أعلاه لايمكن أن تحل لأيجاد δ_3 بالطرق الجبرية لكونها متسامية . لزاوية حمل δ_1 معلومة فان القيمة القصوى او المحددة للزيادة ΔP تكون معطاة بالعلاقة $\delta_3 = \pi - \delta_2$ نقطرية (أنظر 3.5 ب) .
تبصر في تذبذب المولد حيث انسيعجل اولاً ثم يتباطأ مع زيادة في زاوية الحمل ولنفرض ان قاعدة المساحة المتساوية قد تم الانباء بها عندما $\delta \to \delta_2$. ولقد بينا قبل قليل أن δ اذا لم تتجاوز δ_3 فان زاوية حمل المولد ستتناقص وتستقر عند $\delta =$

δ_2 . ولـكن اذا تأرجح المولد الى أن تصبح $\delta > \delta_3$ بدون الايفاء بقاعدة المساحة المتساوية فانه في هذه الحالة سيدور بسرعة أكبر من السرعة المتزامنة ولذلك فان زاوية حمله ستستمر في التزايد . انتقال القدرة الأن أقل من P_2 ولذلك فان المولد سيستمر في التعجيل ولهذا السبب ستزداد زاوية حمله . عند $\delta = \pi$ نقطرية فان منظومة القدرة تكون مقصورة الدائرة أي أن E_1 و E_2 يكونان متعاكسي الطور في الزمن ولكنهمـا منطبقا الطور حول الحلقة المغلقة بين المولد وقضيب التوزيع اللانهائي لزاوية حمـل $\pi < \delta < 2\pi$ نقطرية يكون جريان القدرة الـكهربائية سالباً (أي أن الماكنة تعمل محركاً نسبة الى قضيب التوزيع اللانهائـي) وستضاف القدرة الى القدرة الميكانيكية الداخلة . والتعجيل سيستمر في التزايد . عند ما تكون $\delta > 2\pi$ نقطرية يقال ان المولد منزلق – القطب (زوج من الأقطاب أو دورة واحدة) : أنظر نهاية الفقرة 3.3.3 . تعويض $\delta_3 = \pi - \delta_2$ في المعادلة [3.12c] يعطينا قاعده المساحة المتساوية للقيمة المحددة لتغير الحمل وكما يلي .

$$\cos \delta_1 + \cos \delta_2 = (\pi - \delta_1 - \delta_2) \sin \delta_2 \qquad [3.13]$$

اذا اعطينا δ_1 فان هذه المعادلة تكون كذلك متسامية . يمكن حل هذه المعادلـة تقريباً بطريقة بيانية (حساب – المربعات) ويستعمل الجواب . اذا كانت بنا حاجة الـى دقـة اكثر ، للبدء في طريقة تكرارية تحليلية لايجاد الحل . قاعدة المساحة المتساوية يمكن ان تستعمـل كذلك لتخمين التأرجح في زاوية الحمل للمحرك المتزامن عند تعرضه الى تغير كبير ومفاجيء في الحمل الميكانيكي .

3.3.2. التغير في مفاعلة الانتقال نتيجة للاقلدة

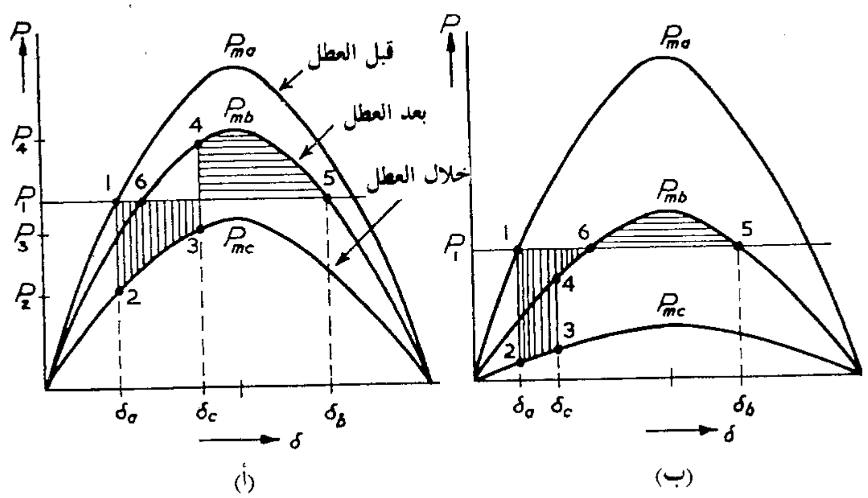
CHANGE IN TRANSFER REACTANCE DUE TO SWITCHING

اذا كان المغذي الرابط يتألف من خطين او اكثر على التوازي فان فصل احد الخطوط نتيجة للأقلدة (يفترض ان يحدث ذلك أنيا وفي اللحظة نفسها عند طرفي الخط) ، سيزيد مفاعلة الانتقال : انظر المثال المحلول 3.1 . وبذلك فان مسألة المساحة المتساوية ستشتمل على منحني قدرة / زاوية متراكبين . على الطالب ان يقتنع بنفسه ان الصيـغ الرياضية للفقرة السابقة ماتزال تنطبق (ربما مع بعض التغيرات في الترميز) .

3.3.3 التغير في مفاعلة الانتقال نتيجة لحدوث عطل

CHANGE IN TRANSFER REACTANCE DUE TO A FAULT

تطبيق قاعدة المساحة المتساوية في هذه الحالة يحتاج الى ثلاثة منحنيات قدرة / زاوية احدهما للمنظومة ماقبل العطل والاخر للمنظومة خلال العطل والاخر للمنظومة بعد فصل الخط المصاب بالعطل. شكل 3.6 يوضح حالتين محددتين للمساحات المتساوية



شكل 3.6 قاعدة تساوي المساحة لعطل على المغذي الرابط ، الشكل يبين زاوية فصل العطل الحرجة δ_c لحالتين مختلفتين

المطلوب ايجاد قيمة زاوية ازالة العطل الحرجة δ_c اي زاوية الحمل القصوى التي عندها او قبلها يجب ازالة العطل لـكي نحافظ على الاستقرارية. على الطالب ان يبين ان δ_c يمكن ان تعطى بالمعادلة التالية

$$\cos \delta_c = \frac{P_1(\delta_b - \delta_a) + P_{mb} \cos \delta_b - P_{mc} \cos \delta_a}{P_{mb} - P_{mc}} \qquad [3.14]$$

حيث ان العلامات المستعملة قد تم تعريفها في شكل 3.6 (أ) ويجب ان يأخذ بنظر الاعتبار امكانية تطبق المعادلة [3.14] على شكل 3.6 (ب). المخططـــان

يوضحان على التوالي ازالة العطل بعد وقبل زاوية الحمل الموافقة لاشتغال الحالة المستقرة النهائي .

انــزلاق القطــب *Pole-slipping*

انزلاق القطب ، الذي تم وصفه في نهاية الفقرة 3.3.1 ، عندما تتجاوز زاوية الحمل δ بين المولد وقضيب التوزيع اللانهائي (اي ماتبقى من منظومة شبكة التغذية) 360° . وهذا يكون عرضة للحدوث خلال عطل المنظومة خصوصا عندما يكون العطل قريبا من المولد . وتكون عرضة للحدوث ايضا نتيجة لاقلدة المغذي الرابط (انظرالفقرة 3.3.2) .

عند الحاجة الى رفع خط من الخدمة فمن المعتاد تقليل الحمل الذي ينقله الخط الى أقل كمية ممكنة قبل فتح قواطع الدورة . من ناحية ثانية فانه اذا أنفصل أحد الخطوط نتيجة للتحميل المفرط فان الانتقال المفاجيء للحمل الى الخطوط المجاورة سيولد حالات عابرة ثم تأرجحات قدرة بين مجاميع المولدات . واذا ازدادت هذه التأرجحات في قيمــة ذروتها (اي أن المنظومة غير مستقرة) فانه سيحصل انزلاق قطب لمولد او اكثر . كلما مرت δ خلال 360° فان المولد قد يسترجع تزامنه أولايسترجع اعتماداً على سرعة الدوار . اذا كانت سرعة الانزلاق عالية بما فيه الكفاية فانه من المحتمل حدوث عدة انزلاقات قطب .

انزلاقات القطب المتعددة في منظومة القدرة لايسمح بها في المملكة المتحدة لأنه خلال انزلاق القطب سيولد تيارالاثارة بروزاً واضحاً ثم تقلبات ذات قيمة في تيار وفولتية الساكن . هناك مخاطرة ايضاً لأحتمال افلات مساعدات المحطة أو المغذيات نتيجــة للفولتية — الخفيضة وهكذا فان المولد يفلت عادة من المنظومة اذا انزلق قطبه اكثر من مرة خــلال فترة معينة من الزمن . يكشف انزلاق القطب عادة بوساطة مرحل قدره معكوسة يشــغل جهاز التوقيت . يصمـم الموقت لــكي يعود الى وضعه بعد فترة معينـة من الزمن ، اعتيادياً حوالي 30 ثانية ، ولكنه اذا ثم كشف انزلاق قطب ثانٍ قبل اعادة الموقت الى وضعه فانه سيتم افلات المولد .

قد تنشأ بعض المشاكل بسبب هذا الترتيب . فقد بينت فحوص حديثة أن جريان القدرة في المولد ليس من الضروري أن ينعكس خلال انزلاق القطب . هذا بسبب فعل المولد الحثي الذي سيحصل نتيجة للتيارات الدوامية المتولدة في تشكيل الدوارالفولاذي .

وتحت ظروف منظومة معينة وخصوصاً عند الأثارة المنخفضة من الممكن أن ينزلق قطب المكائن بصورة بطيئة جداً وقد يأخذ عدة دقائق لتكملة دورة أنزلاق واحدة . هذا يجعل تنظيم معايرة الحماية صعباً جداً . ومن جهة اخرى فان من حسن الخط أن انزلاقات القطب البطيئة تكون اضطرابات في المنظومة أصغر بكثير من تلك التي تكون بسبب انزلاقات القطب السريعة .

انزلاق القطب يولد كذلك تأثيرات غير مرغوب فيها في منظومة الأثارة . فخلال انزلاق القطب تتولد تيارات كبيرة جداً في ملفات الدوار عند اقتراب زاوية الحمل من 180 والزوايا اكبر من 180° يقل تيار الدوار بصورة حادة للمحافظة على توازن الق.د.مغ بين ملفات الدوار والساكن .وفي منظومات الاثارة بالمقوم الحديثة لايمكن لتيار الدوار أن ينعكس ولذلك عندما يقل تيار الدوار الى الصفر ويحاول الانعكاس فانه لايمكن الاستمرار في المحافظة على توازن الق.د.مغ . ولذلك سيحصل تغير حاد في الفيض . وهذا سيتسبب في نشوء فولتية معاكسة كبيرة عبر المقومات قد تتلفها اذا لم تكن ذات تقنين مناسب . لذلك من المهم أن نستطيع توقع الفولتيات المحتثة المعاكسة تحت ظروف انزلاق القطب . وبما أن جسم الدوار الفولاذي يعمل بوصفه ملفات اخماد ذات تيارات متولدة تساعد على المحافظة على توازن الق.د.مغ . فان الفولتيات المتولدة ستكون أقل مما في حالة عدم جريان تيارات جسم الدوار . ولذلك من المهم . كذلك . أن نتمكن من توقع تأثيرات تيارات جسم الدوار .

3.4 ميكانيك الحركة الزاوية Mechanics of angular motion

في ادناه ملخص لمعادلات الحركة الزاوية

القصور الذاتي = الكتلة × (نصف قطر الدوران)^2

الزخم = القصور الذاتي × السرعة

عزم الدوران = معدل تغير الزخم

= القصور الذاتي × التعجيل

الطاقة = عزم الدوران × الأزاحة

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}$ × القصور الذاتي × (السرعة)^2

= $\frac{1}{2}$ × الزخم × السرعة

القدرة = عزم الدوران × السرعة

= (القصور الذاتي × السرعة) × التعجيل

$[3.15]$ = الزخم × التعجيل

3.4.1 الزخم (M) او ثابت القصور الذاتي (H)

من الملائم للمهندس الكهربائي عند دراسته المعادلة [3.15] ان يستعمل للزخم M وحدة تتوافق مع وحدات القدرة المعجلة P_a (بالواط أوبالوحدة الأكثر استعمالاً MW) والتعجيل الزاوي $d^2\delta/dt^2$ (rad/s²) . وهكذا فأن وحدة M ستكون MWs²/rad أو MJs/rad وبذلك يمكن كتابة المعادلة [3.15] كما يلي :

$$P_a = M\frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad [3.16]$$

$$\left[MW = \frac{MWs^2}{rad}\cdot\frac{rad}{s^2}\right]$$

القدرة المناظرة لعزم دوران معين تتغير مباشرة كالسرعة : وكذلك يفعل الزخم لكتلة دوارةمعينة . ان تغيرات السرعة ، ضمن منطوق هذا الفصل . تكون قليلة (على أساس عدم فقدان الأستقرارية) ولذلك فان كلا من قيمتي P_a و M هي القيمة الموافقة للسرعة المتزامنة . وزاوية الحمل δ يمكن ان تقاس بدلالة الزوايا النقطرية أو بالدرجات وكلتاهما يمكن ان تكون ميكانيكية أوكهربائية ولكن M و δ يجب ان تقاسا بالوحدة الزاوية نفسها . اذا تغيرت قيمة δ من نقطرية الى درجات فان قيمتها العددية ستزداد بالمعامل $(360/2\pi)$ بينما قيمة M ستنقص بالمقدار نفسه . لذلك فأن القيمة العددية للقدرة P_a تكون مستقلة (كما يجب ان تكون) عن اختبار الوحدة الزاوية . وبالتشابه فان عامل التحويل الذي يجب ان يستعمل في التغييرمن قياس زاوي ميكانيكي الى كهربائي هو

$$1° \text{ ميكانيكية} = p° \text{ كهربائية} \qquad [3.17]$$

حيث ان p يمثل ازواج الأقطاب للماكنة . التردد ، f Hz ، وسرعة الدوار ، n rev/s ، تربطهما العلاقة .

$$f = pn \qquad [3.18]$$

اذا رمزنا للطاقة الحركية للدوار عند السرعة المتزامنة بالرمز $(K.E.)$ فان عزمها عند هذه السرعة سيعطي بالمعادلة التالية .

$$M = 2(K.E.)/\omega \qquad [3.19]$$

حيث ان السرعة المتزامنة ω ستكون $\omega = 2\pi n$ بوحدات rad/s الميكانيكية و $\omega = 2\pi f$ بوحدات rad/s الكهربائية و $\omega = 360f$ بوحدات deg/s الكهربائية . الوحدات المستعملة في المعادلة [3.19] يجب ان تكون متوافقة . حتـــى في مجموعات المولدات ذات التصميم المتشابه مثلا مجموعات التوربين البخاري ذي سرعة 3000 دورة في الدقيقة ، تتغير الطاقة الحركية والزخم على مدى واسع مع تغيير تقنينها . لذلك فبدلا من استعمال الزخم غالبا مايستعمل القصور الذاتي (اوثابت الطاقة المخزونة) بديلا ويعرف كما يلي

$$H = \frac{(K.E.)}{S} \frac{\text{MJ}}{\text{MVA}} (= \text{s}) \qquad [3.20]$$

حيث ان S هي القدرة المقننة للمولد مقاسه بالـMVA . قيم H بالثواني تتغير ضمن مدى صغير نسبيا فمثلا لمجموعات التوربين البخارية التي في الاستعمال حاليا ذات سرعة 1500 دورة في الدقيقة تتراوح في قيم H بين 10 للمجموعات الصغيرة وحوالي 6 للمجموعات الكبيرة (100 MW) بينما للمجموعات ذات سرعة 3000 دورة في الدقيقة تتراوح من حوالي 6 للمجموعات الصغيرة الى حوالي 3 للمجموعات الكبيرة (500 MW) . بينما لمجموعات التوربين المائية فان H تزداد مع القدرة المقننة من حوالي 2 الى 4 اعتمادا على السرعة .
علاقة M بالقصور الذاتي H هي

$$(K.E.) = HS = \tfrac{1}{2}M\omega \quad \text{MJ} \qquad [3.21]$$

وهكذا فلمجموعة معينة تتناسب M و H مباشرة كما في المعادلة التالية

$$M = HS/180f \quad \text{MWs}^2/\text{elec. deg.} \qquad [3.22a]$$

معادلة القدرة المعجلة [3.16] يمكن اعادة كتابتها كما يلي

كتابتها $\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{180f}{HS}\right)P_a$ elec. deg./s^2 [3.22b]

حيث ان P_a مقاسة بالـ MW و MVA .

اذا كانت القدرة المعجلة مقاسة بنسبة الوحدة (p.u.) فان $P_{apu} = P_a/S$ و

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{180f}{H}\right)P_{apu} \quad \text{elec. deg./s}^2 \qquad [3.23]$$

واذا كانت القدرة المعجلة مقاسة بنسبة الوحدة والسرعة المتزامنة بالزوايا النقطرية الكهربائية لكل ثانية . فان

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{\pi f}{H}\right)P_{apu} \quad \text{elec. rad./s}^2 \qquad [3.24]$$

لكل من الحالات اعلاه يكون العامل الذي بين الاقواس مساويا للقيمة $1/M$. المعادلة [3.23] هي المعادلة التي ستستعمل عادة في الفقرة 3.5 وسيؤخذ تكاملها مرتين للحصول على زاوية الحمل δ بوصفها دالة للزمن t .

3.4.2 تبسيط منظومة القدرة الى ماكنة واحدة مربوطة الى قضيب توزيع لانهائي

REDUCTION OF A POWER SYSTEM TO ONE MACHINE CONNECTED TO AN INFINITE BUSBAR

اذا كانت عدة مجموعات توليد تشتغل على التوازي عند احدى نهايات مغذ رابط فان مفاعلة الانتقال بينها يمكن اهمالها نسبة الى مفاعلة المغذي الرابط وبذلك فان هذه المجموعات يمكن ان تبدل بمجموعة مكافئة واحدة (رمزها السفلي e) بأخذ مجموع الطاقة الحركية الكلية . وبذلك فان

$$H_eS_e = H_1S_1 + H_2S_2 + \ldots$$

واذا تم ابدال قدرات مقننة متعددة بمقنن أساس اختياري S_b ، مع تغير مناظر في H الى H_b بحيث انه مثلا $H_{1b}S_b = H_1S_1$ فان

$$H_{eb}S_b = H_{1b}S_b + H_{2b}S_b + \dots$$
$$H_{eb} = H_{1b} + H_{2b} + \dots \qquad [3.25]$$

وهكذا فانقيم القصور الذاتي المأخوذة على اساس قدراتها المقننة الحرارية المنفردة ستتغير الى المقنن الاساس المختار باستعمال التناسب العكسي ثم الجمع .
اذا طبقنا [3.25] على المجموعات كلها عند الطرف المصدر للقدرة لمغذ رابط ثم على المجموعات كلها عند الطرف المستلم للقدرة فان منظومة القدرة يمكن أن تقل الى مولد مكافيء ومحرك مكافيء مربوطين سوية بالمغذي الرابط – أي منظومة الماكنتين . هذه المنظومة ستبسط الان الى مولد مكافيء واحد مربوط الى قضيب توزيع لانهائي . افرض انه نتيجة لزيادة مفاعلة الانتقال للمغذي الرابط مثل انتقال القدرة بمقدار ΔP . عندئذ من المعادلة [3.16] يكون تعجيل المولد $\Delta P/M_g$ ويكون تباطؤ المحرك $\Delta P/M_m$. تعجيل المولد نسبة الى المحرك هو الفرق الجبري وهذا الفرق يجب ان يساوي تعجيل المولد المفرد المكافيء نسبة الى قضيب التوزيع اللانهائي . وهكذا فبعد حذف ΔP يمكن ان نكتب المعادلة

$$\frac{1}{M_e} = \frac{1}{M_g} + \frac{1}{M_m} \qquad [3.26a]$$

ومن المعادلة $[3.22a]\, M' = M/S_b = H/180f$, so ولذلك فان

$$\frac{1}{H_e} = \frac{1}{H_g} + \frac{1}{H_m} \qquad [3.26b]$$

حيث ان كل قيم H مأخوذة على الاساس المشترك S_b .
لذلك وبناء على ماذكر أعلاه يمكن تبسيط منظومة قدرة معقدة الى مولد مكافيء مربوط الى قضيب توزيع لانهائي والتي هي نوع المنظومة نفسها التي تم افتراضها في بداية هذا الفصل .

مثال محلول 3.2

مولد A مقنن عند 1500 r.p.m. , 75 MVA, 60 MW, 50 Hz وله ثابت قصور ذاتي $H = 7{\cdot}5$ MJ/MVA البيانات المناظرة لمولد آخر B هي 50 Hz, 133·3 MVA, 120 MW, 3000 r.p.m., 4·5 MJ/MVA . (أ) اذا تم تشغيل

المولدين على التوازي في محطة قدرة فاحسب H للمولد المكافيء على الاساس 100 MVA (ب) اذا تم ربط محطة القدرة الى محطة قدرة اخرى لها زوج من كل نوع من المولدات فاحسب H للمولد المكافيء المربوط الى قضيب التوزيع اللانهائي .

الحل

الاساس 100 MVA

(أ)

(*a*) $H_A = 7{\cdot}5(75/100) = 5{\cdot}625$ MJ/MVA
(i.e. 562·5 MJ per 100 MVA)
$H_B = 4{\cdot}5(133{\cdot}3/100) = 5{\cdot}999$ MJ/MVA

وللمولد المكافيء

$$H_e = 5{\cdot}625 + 5{\cdot}999 = 11{\cdot}624 \text{ MJ/MVA}.$$

(ب) H_e لمحطة القدرة الثانية سيكون ضعف ذلك الذي للاولى أي 23·248 MJ/MVA لذلك فان قيمة H للمولد المكافيء المربوط الى قضيب التوزيع اللانهائي هي

$$\frac{1}{H_e} = \frac{1}{11{\cdot}624} + \frac{1}{23{\cdot}248}$$

$$H_e = 7{\cdot}749 \text{ MJ/MVA}.$$

3.4.3 برهان قاعدة المساحة المتساوية

من المعادلة [3.16] وبالاشارة الى شكل 3.5 يمكن ان نكتب

$$\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{P_a}{M}$$

وبضرب الطرفين بـ $\mathrm{d}\delta/\mathrm{d}t$ نحصل على

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}\right)^2 = \frac{P_a}{M} \cdot \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \left[\int \frac{2P_a}{M} \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot dt \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$= \left[\frac{2}{M} \int P_a \cdot d\delta \right]^{\frac{1}{2}}$$

وزاوية الحمل δ ستكون لها قيمة انعطاف (قصوى) عندما تكون $d\delta/dt = 0$ اي انه عندما

$$\int_{\delta_1}^{\delta_3} P_a \cdot d\delta = 0$$

وهكذا فان الدوار سيتأرجح من δ_1 الى القيمة القصوى δ_3 التي تكون عندها السرعة النسبية مساوية لصفر. المساحتان المظللتان يجب ان تكونا متساويتين ومتعاكستين بالاشارة .

3.5 منحنى التأرجح (منحنى زاوية الحمل / الزمن)

Swing curve (load angle/time curve)

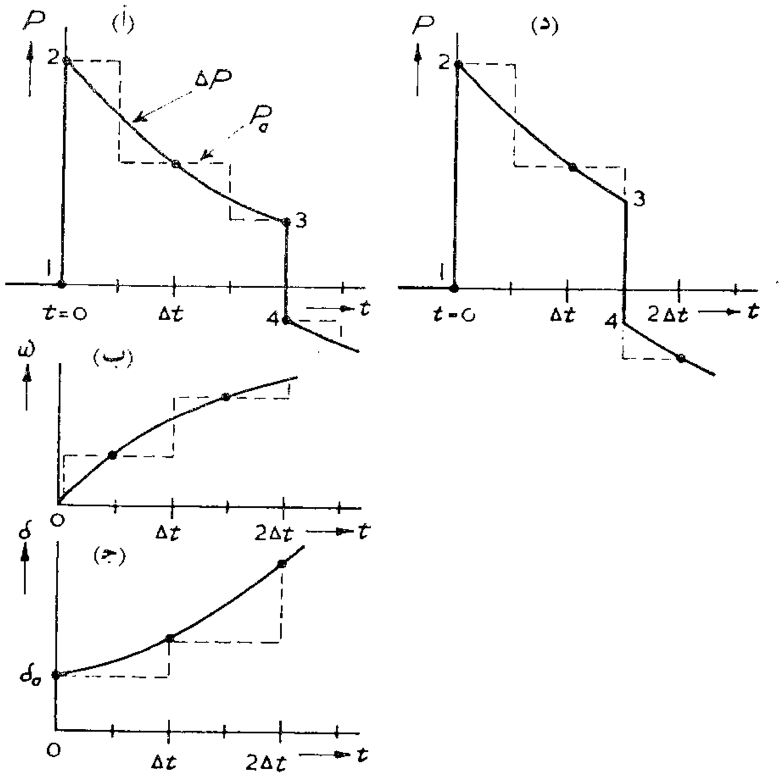
اشارة الى شكل 3.6 (أ) سيكون فرق القدرة بين دخل مجموعة المولد وخرجها كما يلي

$$\Delta P = P_1 - P_m \sin\delta \qquad [3.27]$$

حيث ان P_1 هي القدرة الداخلة الميكانيكية للحالة المستقرة الابتدائية للمولد والتي سنفترض على انها ثابتة طوال هذه التحليلات لان ثابت الزمن للمتحكم وللبخار المحصور سيكون طويلا نسبيا و $P_m \sin\delta$ هي القدرة الكهربائية الخارجة من المولد وتكون مساوية لانتقال القدرة على طول المغذي الرابط . P_m ستأخذ القيمة الملائمة P_{ma} و P_{mb} و P_{mc} وستكون معطاة . بالحدود العامة . بالمعادلة [3.10] .

معادلة حركة الدوار (باهمال الاخماد) هي

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} + P_m \sin\delta = P_1 \qquad [3.28]$$



شكل 3.7 حل منحني التارجح بطريقة خطوة – خطوة مبينا فيه عدم – استمرار القدرة المعجلة عند (أ) النهاية و(ب) في منتصف الفترة الزمنية . النقاط المرقمة تتناظر مع تلك التي لشكل 3.6 أ

المعادلة 3.28 هي معادلة لا خطية وتحل بصورة تقريبية عادة باحدى طرق خطوة خطوة أو الطرق التكرارية والتي يفرض فيها ان الكميات المختلفة ستبقى ثابتة على مدى فترة قصيرة من الزمن Δt (تكون عادة حوالي 0.05 ثانية) : انظر شكل 3.7 . وعند حدوث الاضطراب الكبير المفاجيء عند $t = 0$ فان فرق القدرة ΔP سيكون معلوماً حيث أن $\delta = \delta_a$ (شكل 3.6 أ) واذا أخذنا ΔP على أنه القدرة المعجلة فان التغير الحاصل في الزاوية يمكن تقديره ويعاد تكرار هذه الطريقة . من الواضح أن هذا سينتج أن قدرة التعجيل المفترضة ستكون دائما أكبر من قدرة التعجيل الفعلية . لذلك فانه قد تم الأخذ بالافتراضات التالية :

(أ) القدرة المعجلة P_a التي سيتم افتراضها عند بداية أي فترة سيفرض أنها ستكون موجودة من منتصف الفترة السابقة الى منتصف الفترة الحالية . هذا سينتج منحنى

قدرة مفترضة متدرجاً يكون معدله مقارباً للقدرة الفعلية . وفيما يخص الفترة الأولى تكون القدرة المعجلة مسارية لـ P_1-P_2 لنصف الفترة فقط. وتكون صفراً لنصف الفترة السابق . ولذلك فان القدرة المعجلة P_a التي ستستعمــل للفترة الأولــى ستكــون $(P_1-P_2)/2$ أي أنه معدل قدرة الفروق قبل وبعد نقطة عدم الاستمرار مباشرة في ΔP . وبالتشابه فاذا كانت زاوية الأقلدة هي δ_c (شكل 3.6) عند نهاية الفترة الزمنية فان قيمة المعدل $(P_3+P_4)/2$ ستفترض للفترة التالية (انظر شكل 3.7 أ) .

ومن جهة أخرى فاذا حدثت نقطة عدم الاستمرار عند منتصف الفترة الزمنية فلا توجد ضرورة لأية تصحيحات . انظر شكل 3.7 (د) .

(ب) اذا أخذنا نقاط عدم الاستمرار بنظر الاعتبار كما بينا أعلاه فانه باستعمال الوحدات في [3.23] يمكن أعادة كتابة [3.28] كما يلي

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{180f}{H}\right)P_{apu} \simeq \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\Delta\omega = \left(\frac{180f\,\Delta t}{H}\right)P_{apu} \qquad [3.29]$$

المعادلة [3.29] تعطينا التغير في السرعة $\Delta\omega$ خلال الفترة الزمنية Δt . تم الافتراض أن $\Delta\omega$ تحدث عند بداية الفترة وأن الدورة التكرارية تبدأ بالسرعة $\omega = 0$ (نسبة الى السرعة المتزامنة) عند $t = 0$. السرعة المقدرة لأية فترة يفترض ان تكون صحيحة عند عند منتصف تلك الفترة .

(ج) السرعة خلال أية فترة تكون

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} \simeq \frac{\Delta\delta}{\Delta t}$$

$$\Delta\delta = (\Delta t)\omega \qquad [3.30]$$

المعادلة [3.30] تعطينا التغير في زاوية الحمل خلال الفترة وتبدأ الدورة التكرارية بالزاوية $\delta = \delta_a$ عند $t = 0$.

زاوية الحمل المقدرة لأية فترة يفترض ان تكون صحيحة في نهاية تلك الفترة . والجدول 3.1 يبين التخطيط الملائم للدورة التكرارية (اذا كان عدد الدورات التكرارية كبيراً) .

الطريقة البديلة للدورة التكرارية تحذف حساب سرعة الدوار وتكون كما يلي . اذا كان n هو رقم الفترة أي أنه من الأزمنة $(n-1)\Delta t$ الى $(n)\Delta t$ فعندئذ

$$\Delta\omega_{n-1} = \omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-1\frac{1}{2}} = \left(\frac{180f\,.\,\Delta t}{H}\right) P_{apu(n-1)}$$

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \omega_{n-\frac{1}{2}}\,.\,\Delta t$$

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \omega_{n-1\frac{1}{2}}\,.\,\Delta t$$

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = (\omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-1\frac{1}{2}})\Delta t$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \left(\frac{180f(\Delta t)^2}{H}\right) P_{apu(n-1)} \qquad [3.31]$$

تغير زاوية الحمل عند نهاية كل فترة يكون مساوياً لتغير الزاوية نتيجة للقدرة المعجلة عند بداية تلك الفترة زائداً التغير في زاوية الحمل في الفترة السابقة .

مثال محلول 3 3

مولد مكافيء مربوط الى قضيب توزيع ذي تردد 50 هيرتز له عزم قصور ذاتي مقداره 2·25 MJ/MVA . حدود القدرة للحالة المستقرة قبل العطل وخلال العطل وبعد ازالة العطل هي على التوالي 2·0 ، 0·8 ، 1·5 بنسبة الوحدة . احسب زاوية ازالة العطل الحرجة اذا كان الحمل الابتدائي 1·0 بنسبة الوحدة . جد منحنى التأرجح باستعمال فترة زمنية مقدارها 0·1 ثانية . ثم ازالة العطل عند $t = 0·2$ ثانية .

الحل

بالاشارة الى شكل 3.6 (أ) مع قياس الزوايا بالدرجات الكهربائية :

$$\sin\delta_a = \tfrac{1}{2},\ \delta_a = 30°$$

$$\sin\delta_b = 1/1·5,\ \delta_b = 41·81$$

$$\cos\delta_b = 0·7454$$

$$\delta_b = 180 - 41·81 = 138·19°,\ \cos\delta_b = -0·7454$$

الزمن	s	0·0 قبل العطل	العطل 0·1	0·2	الأقليد 0·2	بعد العطل 0·3	0·4	0·5
δ بالدرجات			30·0	42·0	72·59	72·59	99·29	106·77
$\sin\delta$			0·5	0·6691	0·9542	0·9542	0·9869	0·9575
دخل القدرة	p.u.	1·0	1·0	1·0	1·0	1·0	1·0	1·0
انتقال القدرة		1·0	0·4	0·5353	0·7634	1·4313	1·4804	1·4363
ΔP		0·0	0·6		0·2366	−0·4313		
		→	0·0		→	0·2366		
			2) 0·6			2) −0·1947		
P_a			0·3	0·4647		−0·0973	−0·4804	−0·4363
$\Delta\omega = 400P_{apu}$ deg./s			120·0	185·9		−38·92	−192·16	−174·52
ω الأبتدائية			0·0	120·0		305·9	266·96	74·80
ω خلال الفترة			120·0	305·9		266·98	74·80	−99·72
$\Delta\delta = 0{\cdot}1\omega$	deg.		12·0	30·59		26·70	7·48	−9·97
δ الأبتدائية			30·0	42·0		72·59	99·29	106·77
δ النهائية			42·0	72·59		99·29	106·77	96·80

الجدول 3.1 حسابات منحني التأرجح للمثال المحلول 3.3

وبتعويض هذه القيم في المعادلة [3.14] نحصل على قيمة زاوية ازالة العطل الحرجة والتي هي $\delta_c = 83{\cdot}69^\circ$.

ومن المعادلة [3.23] وبما ان القدرة هي بنسبة الوحدة فان التعجيل سيكون

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left(\frac{180f}{H}\right)P_{apu} = \left(\frac{180\times 50}{2{\cdot}25}\right)P_{apu} = 4000\,P_{apu}$$

$$\Delta\omega = (4000\times 0{\cdot}1)P_{apu} = 400P_{apu} \quad \text{elec. deg./s}$$

$$\Delta\delta = 0{\cdot}1\omega \quad \text{elec. deg.}$$

انتقال القدرة خلال العطل = $0{\cdot}8\ \delta$ بنسبة الوحدة

انتقال القـدرة بعد ازالة العطل = $1{\cdot}5\ \delta$ بنسبة الوحدة

انظر الجدول 3.1 . واذا رسمنا النتائج فسنلاحظ ان للمولد استقرارية عابرة مستقرة مع زاوية حمل قصوى حوالي 107 درجة كهربائية وارتفاع سرعة أقصى حوالي 1·7% من السرعة المتزامنة (18 000 درجة كهربائية / ثانية) . كذلك بان نصف الفترة ستكون حوالي 0·39 ثانية معطية تردد تذبذب يقارب 1·28 هيرتز .

الطريقة البديلة تكون كما يلي :

$$\frac{180f(\Delta t)^2}{H} = \frac{180\times 50\times 0{\cdot}01}{2{\cdot}25} = 40$$

$$n = 1. \quad \Delta\delta = 40P_{apu} = 40\times 0{\cdot}3 = 12^\circ$$

$$\delta = 30+12 = 42^\circ$$

$$n = 2. \quad \Delta\delta = 12+(40\times 0{\cdot}4647)$$

$$= 12+18{\cdot}59 = 30{\cdot}59^\circ$$

$$\delta = 42+30{\cdot}59 = 72{\cdot}59^\circ$$

3.6 التذبذبات الصغيرة Small oscillations

أنظر الى شكل 3.5 (أ) ولنفرض ان مجموعة المولد تشتغل عند النقطة 1 تحت ظروف الحالة المستقرة عندما زيد دخل القدرة الميكانيكية فجأة بمقدار صغير جدا ΔP بحيث أنه يمكننا ان نفرض ان المنحنى الجيبي سيكون خطاً مستقيماً على مدى التذبذب $\delta_3 - \delta_1$.

أجعل التغير اللحظي الناتج لزاوية الحمل $(\Delta\delta) = \delta - \delta_1$. فالتغير في القدرة الكهربائية المنقولة على طول المغذي الرابط سيعطى بالمعادلة التالية

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\delta}(\Delta\delta) = P_r(\Delta\delta) \qquad [3.32a]$$

حيث ان P_r هو معامل القدرة التزامنية الذي نستطيع الحصول عليه بأخذ تفاضل المعادلة [3.10] أي

$$P_r = \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\delta} = \frac{E_1E_2}{X}\cos\delta \qquad [3.32b]$$

وهو ، في هذا النطاق ، ثابت مناظر لقيمته عندما تكون $\delta = \delta_1$. معادلة حركة الدوار ستكون .

$$M\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2} + P_r(\Delta\delta) = \Delta P \qquad [3.33]$$

والحل العابر يمكن ان نحصل عليه بفرض $\Delta P = 0$ وبتعويض $\mathrm{p} = \mathrm{d}/\mathrm{d}t$ و $\mathrm{p}^2 = \mathrm{d}^2/\mathrm{d}t^2$

$$M\mathrm{p}^2 + P_r = 0$$
$$\mathrm{p} = \pm(-P_r/M)^{\frac{1}{2}} = \pm \mathrm{j}\omega_n \qquad [3.34]$$

حيث ان $\omega_n = (P_r/M)^{\frac{1}{2}}$ وهى التردد الطبيعي غير المخمد للتذبذب بالزوايا النقطرية / ثانية أو $f_n = \omega_n/2\pi$ Hz هيرتز والفترة تكون $T_n = 2\pi/\omega_n$ ثانية / دورة. على الطالب ان يدقق ذلك بان يبين ان الحل الكامل للمعادلة [3.33] هو

$$\delta = \delta_2 - (\delta_2 - \delta_1) \cos \omega_n t \qquad [3.35]$$

لقد تم اهمال كل اقد ومايتبعها من إخماد للتذبذبات لحد الان في هذا الفصل .فلو عددنا K_d معامل إخماد اي قدرة الاخماد لكل وحده سرعة زاويـــة فعندئذ

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} + P_r(\Delta\delta) = \Delta P \qquad [3.36]$$

الاخماد الذي أخذناه بنظر الاعتبار هنا هو الاخماد الكهربائي نتيجة للتيارات الدوامية في دوار المولد نتيجة لسرعة الانزلاق : هذا ليس الاحتكاك الميكانيكي نتيجة للسرعة المطلقة والذي افترضنا أنه قد تم طرحه من قدرة التوربين .

المعادلة المميزة الموافقة للحل العابر للمعادلة [3.36] هي

$$M\mathrm{p}^2 + K_d\mathrm{p} + P_r = 0 \qquad [3.37a]$$

$$\mathrm{p} = \{-K_d \pm (K_d^2 - 4MP_r)^{\frac{1}{2}}\}/2M$$

$$= -(K_d/2M) \pm \mathrm{j}\left(\frac{4MP_r - K_d^2}{4M^2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad [3.37b]$$

ستكون الحركة اما ناقصة اوحرجة اومفرطة – الاخماد اعتمادا على كون الجذر الاخير موجبا او صفرا اوسالبا . معامل الاخماد للاخماد الحرج K_{dc} يكون كما يلي

$$K_{dc} = 2(MP_r)^{\frac{1}{2}} \qquad [3.38]$$

التردّد ناقص – الاخماد للتذبذب يكون كما معطى بالمعادلة التالية

$$\omega_d^2 = (P_r/M) - (K_d/2M)^2$$

$$= \omega_n^2\left[1 - \left(\frac{K_d}{2(MP_r)^{\frac{1}{2}}}\right)^2\right]$$

$$\omega_d = \omega_n(1-\zeta^2)^{\frac{1}{2}} \qquad [3.39]$$

حيث أن $\zeta = K_d/K_{dc} = K_d/(2(MP_r)^{\frac{1}{2}})$ يدعى نسبة الاخماد : الحالات الثلاث أعلاه تكون مناظرة لـ ζ أقل من واحد اومساوية لواحد أو اكبرمن واحد .

قسمة المعادلة [$3.37a$] على M تبين ان هناك أثنين فقط من المعاملات الثلاثة يمكن وصفهما بصورة مستقلة ومن المعتاد وصفهما بصورة غير مباشرة بدلالة ω_n ، ζ وهكذا فان

$$K_d/M = (2\zeta(MP_r)^{\frac{1}{2}})/M = 2\zeta\omega_n$$
$$P_r/M = \omega_n^2$$

والدالة المتنامة للمعادلة [3.36] غالبا ماتكتب كما يلي

$$\frac{d^2\delta}{dt^2}+2\zeta\omega_n\frac{d\delta}{dt}+\omega_n^2(\Delta\delta) = 0$$

وبما ان δ_1 تكون ثابتة فيجب ان نلاحظ أن

$$d(\Delta\delta)/dt = d\delta/dt \text{ and } d^2(\Delta\delta)/dt^2 = d^2\delta/dt^2.$$

ان نظرية التذبذبات الصغيرة يمكن ان تطبق على العديد من المسائل من ضمنها تلك المسائل الخاصة بتغير الحمل على المحركات المتزامنة.

3.7 استقرارية الحالة المستقرة Steady-state stability

في حالة تبسيط منظومة القدرة الى مولد مكافيء مربوط الى قضيب توزيع لانهائي فأن حد أستقرارية الحالة المستقرة لمنظومة القدرة يمكن أن يعطى بالمعادلة [$3.10b$] حيث يكون $P_m = E_1E_2/X$. في هذا الحساب البسيط نفترض أن متحكمات التوربين يمكن أن تزيد دخل القدرة الميكانيكية بمعدل مساوٍ لمعدل الأزدياد البطيء للحمل الكهربائي وأن منظمات الفولتية ومنظومات الاثارة يمكن أن تحافظ على ثبات فولتية المنظومة . في الحسابات العملية لمنظومة قدرة معقدة ، يجب أن نفترض أن الهبوط في فولتية المنظومة كلما ازداد الحمل سيسبب تشغيل مغيرات مأخذ المحول . وعند وصول هذه الى حدودها فأن فولتية المنظومة ستستمر بالهبوط كلما ازداد الحمل. الأفتراض المعقول هو أن نقول أننا وصلنا حد الأستقرارية للحال المستقرة اذا هبطت فولتية المنظومة الى 0.8 بنسبة الوحدة . وأي حمل منظومة فعلي يجب أن يكون أقل من هذا الحد

النظري بنطاق أمان مناسب لأن الحد الأدنى القانوني لفولتية المستهلك ، مثلاً ، هو 0.94 بنسبة الوحدة .

لأي حمل منظومة معين (مثلاً حمل الذروة المقدر لسنوات عديدة مقدماً) يجب أجراء تحليلات سريان قدرة وكما نوقشت في الفصل 8 . وعند هذا الحمل يجب ان تشتغل المنظومة بأستقرارية في حالتها المستقرة . ويمكن أن يحدد ذلك بطريقتين . (أ) اذا أفترضنا أن زاوية حمل المولدات ستزداد بمقدار $5°$ مثلاً فأن القدرة التزامنية ستسبب عودة المولد الى زاوية حمله الأصلية . بعد تذبذبات مخمدة . في الحسابات النموذجية قد نفترض أن الزيادة في التباعد الزاوي هي تلك التي للمولدين اللذين لهما أكبر تباعد زاوي. هناك أختبار بسيط للتأكد من أن الحركة ستكون ذات تذبذبات مخمدة هو أن يكون معامل القدرة التزامنية $P_r = (E_1E_2/X)\ \cos\delta$ لكل المولدات موجباً . أنظر المعادلة [3.6] . (ب) اذا أفترضنا زيادة بسيطة في الحمل فان كل المولدات يجب أن تستجيب مع زيادة في خرجها الكهربائي . أي أن $P_r = \mathrm{d}P/\mathrm{d}\delta$ يكون موجباً لكل المولدات . وعند أختيار تغير الحمل مقداراً وموقعاً . يجب أن يكون أختيار أسوء حالة أي أنه ذلك الاختيار الذي يكون أكثر أحتمالاً لتسبيب عدم الأستقرارية . وهكذا فكلتا الحالتين تقود الى القاعدة نفسها .

فاذا أخذنا ، مثلاً ، منظومة قدرة ذات ثلاث مولدات مترابطة فيما بينها بمنظومة نقل حلقية فأن مفاعلة الأنتقال بين أي زوج من المولدات يمكن أن تحدد بوساطة الطرق التي تم أجمالها في الفقرة 3.2.2 . وبأستعمال المعادلة [3.9] بقيم مفروضة لزاوية الحمل فأن معادلات القدرة يمكن أن تكتب وعند أخذ تفاصيل هذه المعادلات نسبة الى زاوية الحمل فستعطينا القدرات التفاضلية بهيئة $\mathrm{d}P = (\mathrm{d}P/\mathrm{d}\delta)\ \mathrm{d}\delta$. ان حل هذه المعادلات سيعطينا قيم P_r لكل مولد وكل منها يجب أن يكون موجباً اذا كان على المنظومة أن تكون مستقرة لظروف الحمل المفترضة .

منظومات عقدرة معرضة دائما لتقلبات مستمرة في الحمل وهذه يجب ان تنتج ، في أسوأ الحالات ، تذبذبات مخمدة تقترب في نهايتها من ظرف الحالة المستقرة. وأعادة توزيع القدرة الأبتدائي بعد زيادة كبيرة مفاجئة (10% مثلا) في الحمل سيتحدد بقيم معاملات القدرة التزامنية P_r وبثوابت القصور الذاتي H لاحقاً وأخيراً بأنخفاضات سرعة متحكمات التوربينات .

3.8 طرق تحسين استقرارية منظومة القدرة

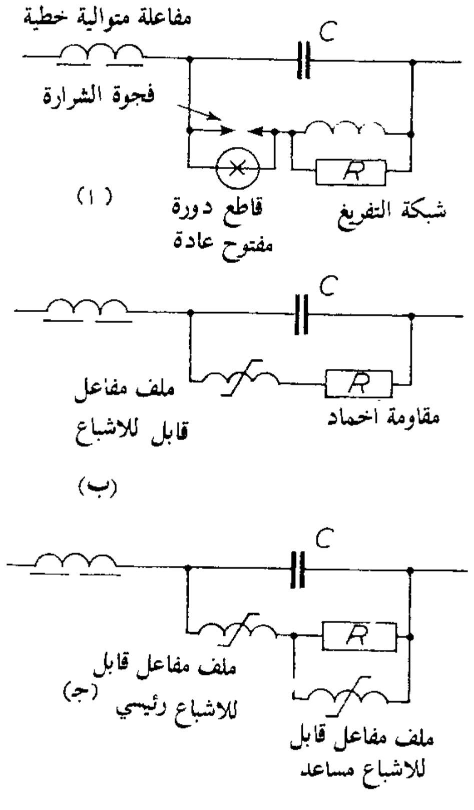
Methods of improving power-system stability

من الشكل 3.5 والمعادلة [3.10] يمكننا أن نلاحظ أن مشكلة المحافظة على استقرارية منظومة القدرة ستكون أكثر بساطة اذا كانت قيمة $P_m = (E_1E_2/X)$ كبيرة لأنه لأي حمل معطى ستكون δ_1 صغيرة ولأية زيادة معينة في الحمل ستكون الزيادة في زاوية الحمل $\delta_2-\delta_1$ صغيرة. ضمن هذا المفهوم ستكون المولدات ذات القطب البارز أكثر أستقراراً من المولدات ذات الدوار الأسطواني (أنظر الفقرة 3.2.1). ويمكننا زيادة P_m برفع فولتية المنظومةفوق قيمتها الأسمية وتقليل مفاعلة الأنتقال. وهكـــذا فأن المغذيات الرابطة (مثلاً الشبكة الكبرى) . (أ) يجب أن تكون لها مفاعلة حثية متوالية منخفضة بأستعمال الموصلات الحزمية (الجزء 1 الفقرة9·3) مع أقل مباعدة بين الأطوار وكذلك بأستعمال المتسعات المتوالية (الجزء الفقرة). (ب) يجب أن تتألف من عدة خطوط متوازية وحلقات مغلقة ويجب أن تستعمل محولات ذاتية (تكون مفاعلها التسربية أخفض من النوع ذي اللف- المزدوج). ويمكن تحسين الأستقرارية بتقليل زمن ازالة العطل (ازمان الحماية زائداً قاطع الدروة) بحيث أن العطل يزال بزاوية حمل أقل من زاوية أزالة العطل الحرجة . δ_c في شكل 3.6 . ومفاعلة الأنتقال يجب أن تبقى منخفضة بعد فصل الجزء العاطل من المنظومة أمااذا أستعملنا أعادة غلق ذاتي لقواطـــع الدورة (الفقرة 1.4.2) ولم يزال العطل في الزمن الميت الأول فأن تأثير أعادة الغلـــق سيقلل القدرة التزامنية وبذلك فأنه سيتسبب في زيادة أحتمال عدم الأستقرارية . وفي منظومة الشبكة الكبرى تكون أغلب أنواع أعادة الغلق الذاتي من نوع الأطلاق الأحادي المؤخر . أي أن قاطع الدورة في أحد الأطراف سيعاد غلقه ويبقى مغلوقاً للتأكد من أنـــه تمت ازالة العطل قبل غلق قاطع الدورة الثاني . بعض خطوط النقل الطويلة جداً تضم . على مراحل تقارب 150 كم ، معدات تعويض مفاعلة متوازية تلقائية سريعة جـــداً (انظر الجزء 1 شكل 1.21) للمحافظة على فولتية المنظومة في المنشآت . وكل جزء بين مثل هذه المنشآت يمكن أن يشتغل بزاوية حمل تقارب $60°$ مع زاوية حمل كليـــة تقارب $150°$. (هذا غير مطبق لحد الآن في منظومة الشبكة الكبرى في المملكـــة المتحدة).

والفقرات التالية ستناقش الطرق الأخرى لتحسين الأستقرارية .

3.8.1 الوصيلات الرنانة RESONANT LINKS

تمت مناقشة استعمال الملفات المفاعلة المحددة للتيار لتقليل تيار العطل في الجزء 1 الفقرة 8.2.2 .. هذه الملفات المفاعلة تزيد انتظام الفولتية نتيجة لتيار الحمل وكذلك تزيد مفاعلة الانتقال وبذلك فانها تزيد مشكلة المحافظة على استقرارية منظومة القدرة سوءً . كذلك تمت مناقشة استعمال المتسعات المتوالية لتقليل المفاعلة الكلية للخط في الجزء الأول الفقرة 1.5.1 . هناك مشكلة ستنشأ من استعمال هذه المتسعات وهي الفولتية المتزايدة عبرها عندما تحمل تيار العطل . الوصيل الرنان يجمع هاتين الفكرتين في جهاز واحد . المراحل الثلاثة في تطوير هذه المعدات مبينة في شكل 3.8 . ويستعمل الوصيل بصورة رئيسية في المنشآت الصناعية لربط هذه المنشآت الى شبكات التجهيز العامة . اذا آزدادت الخبرة المكتسبة وازدادت المقننات فيمكن عند ذلك نصب هذه الوصيلات في شبكات التجهيز العام .



شكل 3.8 وصيلات رنانة (أ) فجوة شرارة (ب) ملف مفاعل قابل للاشباع مفرد (ج) ملف مفاعل قابل للاشباع مزدوج (قارن محدد للدائرة القصيرة – SLC)

شكل 3.8 (أ) يبين وصيلاً ذا فجوة شرارة بسيطاً وفيه متسعة C تتم توليفها الى الرنين المتوالي تقريباً . عند تردد المنظومة . مع محاث خطي . عندما تكون المتسعة C حاملة للتيار فان الفولتية عبرها ستظهر عبر فجوة الشرارة التي تم تنظيمها بحيث أنها لا تسبب شرراً عرضياً لأي تيار حمل اعتيادي وبضمنه تيار حمل الذروة الناتج عند ابتداء تشغيل احمال مكائن ثقيلة . . . الخ . وهكذا فان الوصيل الرنان يمثل على الأغلب ممانعة صفرية لكل تيارات الحمل . وعند حدوث عطل في المنظومة فان فجوة الشرارة ستسبب شرراً عرضياً وبذلك فان C ستكون مقصورة الدائرة جزئياً والمفاعلة الكلية للوصيل ستزداد لكي تحد من تيار العطل بصورة آنية تقريباً ودائرة التفريغ تحدد وتخمد تيار التفريغ من المتسعة C. ويكشف تيار التفريغ هذا بوساطة مرحل يقوم بغلق قاطع الدورة وبذلك فانه يسمح لفجوة الشرارة بمنع التأين والعودة الى وضعها الأول . وعند ازالة العطل في المنظومة بوساطة قاطع الدورة المناسب فانقاطع الدورة الوصيل سيتم فتحه يدوياً . ولكن اعادة وضع المتسعة C المفاجيء الى الوصيل ستسبب فولتية عابرةقد تجعل فجوة الشرارة عرضة لأعادة الاشتعال بحيث أنه من الناحية العملية يجب اعادة ترتيب سريان القدرة في المنظومة لتقليل تيارالوصيل الى حوالي نصف التيار المقنن . هذا التأخير في اعادة ضبط الوصيل سيؤثر عكسياً في استقرارية المنظومة مباشرة بعد ازالة العطل . ان وصيل فجوة الشرارة رخيص نسبياً ولايستعمل الا عندما لايكون الأمان المنظومة واستقراريتها أهمية رئيسية .

شكل 3.8 (ب) يبين قاطع الدورة الوصيل بعد أن تم ابداله بملف مفاعل a.c قابل للتشبع (المرجع Friedlander) تكون فولتيته عند نقطة –الانحناء أكبر من الفولتية عبر C لكل تيارات الحمل . لذلك فان المفاقيد الاعتيادية في مقاومة الاخماد يمكن اهمالها . وعند حدوث عطل في المنظومة سيتشبع الملف المفاعل ويقصر دائرة C جزئياً وبذلك فان ممانعة الوصيل ستكون مقاومية بصورة رئيسية . ان مقاومة الاخماد تكون كبيرة وغالية ووجودها يؤثرعكسياً على استقرارية المنظومة . ومشاكل الوصيل ذي الملف المفاعل القابل للتشبع المفرد تم التغلب عليها الى حد كبير باستعمال الوصيل ذي الملف المفاعل القابل للتشبع المزدوج والذي غالباً ما يدعى بالقارن المحدد للدائرة القصيرة (SLC) : انظرشكل 3.8 (ج) . ولكل ظروف الاشتغال الاعتيادية يكون لدائرة التوازي عبر C ممانعة عالية جداً بحيث أنه تكون للوصيل ممانعة يمكن اهمالها على الأغلب . وعند حدوث عطل على المنظومة سيتشبع المفاعل الرئيسي خلال جزء من دوره وسيمرر تياراً كبيراً خلال مقاومة الاخماد R . التي ستخمد تيار الـ d.c العابر وتقلل عدم

التماثل في تيار العطل . والفولتية عبر R بعد ذلك ستسبب تشبع الملف المفاعل المساعد وتتجاوز R . في هذا الظرف يكون تصميم الوصيل بحيث أن دائرة L و C المتوازية ستكون لها مفاعلة حثية كلية مضافة الى تلك التي للمحاث الخطي لكي تحد من تيار العطل بينما تقلل فقدان الحرارة (ومن ثم السعر) في R خلال ما تبقى من فترة العطل . وعند أزالة العطل سيفقد تشبع الملف المفاعل وبذلك يعاد الحاق R الى الوصيل لأخماد الحالة العابرة عند اعادة الحاق C . يعود الوصيل بعد دوره أو دورتين الى ظرف الرنين وبذلك سيحسن الأستقرارية خلال فترة ما بعد العطل . ان التغيرات في ممانعة الوصيل هي تلقائية بصورة كاملة وتكون لحظية على الأغلب .

تستعمل الوصيلات الرنانة عندما يكون تيار الحمل الاعتيادي خلالها صغيراً وعندما نحتاج الى تقليص كبير في مستوى العطل عند اشتغالها . ونحتاج الى مثل هذا الوضع بين اجزاء قضيب التوزيع أو عند الربط بين موقع توليد صناعي (خاص) وبين التجهيز العام : في مثل هذه الحالات يجب تساوي التغذية الداخلة والحمل على كل جزء الى أقصى ما يمكن وبذلك سنقلل الى أقصى حد انتقال القدرة خلال الوصيل . تطبيق اخر على ذلك . فمثلاً اذا أردنا نصب موقع جديد يعمل على التوازي مع الموقع الحالي : يؤسس الوصيل مع الموقع الجديد ويكون جزءً منه بحيث أن مستويات العطل عند قواطع الدورة الموجودة سوف لا تزيد عن مقنناتها .

ان وجود الوصيل الرنان بين محطة توليد صناعية ومنظومة التجهيز العام يقيد سريان تيار العطل لكلا الاتجاهين وكذلك يقيد سريان القدرة التزامنية : في هذا المعنى فانها سوف لا تكون طريقة لتحسين استقرارية المنظومة خلال العطل . من ناحية ثانية اذا كان مقنن الوصيل يمكن مقارنته مع مقنن الموقع الصناعي فستتوفر قدرة تزامنية كافية لتدقيق التزامن لحالة اللاحمل ولتأرجحات قدرة الى حد ضعف الحمل الكامل الأعتيادي .

الوصيلات الرنانة يمكن ان تحافظ على التزامن بين موقعي تجهيز بشرط ان يحافظ على أزمنة حماية سريعة في جانب التوليد الصناعي . ومن ناحية ثانية فانه اذا كانت أزمنة ازالة العطل ليست بدرجة كافية من القصر لتجنب عدم الاستقرارية فقد يحدث انزلاق قطبي . تصبح الممانعة عبر الوصيل عالية خلال انزلاق القطب الفعلي وعلى أساس عدم تجاوز المقننات الحرارية فانه سيكون هناك زمن كاف للمتحكمات لأعادة الظروف المستقرة (أنظر الفقرة 3.8.3) . وتشغيل الوصيل الرنان تحت هذه الظروف له فائدة عظيمة

هي أن القدرة التزامنية ستكون متوفرة مباشرة بعد انزلاق القطب بدون أي انقطاع في التجهيز .

وبما أن منظومة قدرة الـ a.c ذات الفولتية العالية في المملكة المتحدة (الشبكة الرئيسية) تزداد باستمرار في الحجم ومستوى العطل فان هناك طريقتين لتقوية المنظومة بدون زيادة مستوى عطلها بصورة ملحوظة : احداهما هي وصيل التيار المستمر ذو الفولتية العالية (h.v.d.c.) (انظر الفصل 6) والاخرى هي الوصيل الرنان . الوصيل الرنان هو الأرخص ولكنه لم ينصب في الشبكة لحد الان . كلا هذين الرابطين . عند ربط نقطتين لمنظومة متزامنة . يجب أن يعملا ذلك على التوازي مع المغذيات الرابطة الـ a.c. لتجهيز القدرة المزامنة الضرورية خلال اضطرابات المنظومة .

3.8.2 الاثارة ومنظمات الفولتية الذاتية

EXCITATION AND AUTOMATIC VOLTAGE REGULATORS

الاشتغال الجيد للمولدات المتزامنة لمنظومة قدرة معقدة عند زوايا حمل عالية وخلال الظروف العابرة يعتمد الى حد كبير على مصدر الاثارة للمولدات ومنظمات الفولتية الذاتية (A.V.R.) سنناقش هذه الان على فرض ان للطالب الماما جيداً بالنظريات الاساسية لمنظومات السيطرة .

منظمات الفولتية : هناك متطلبات عديدة لمنظم الفولتية الجيد وهذه المتطلبات قد تتضارب فيما بينها الى حد معين . لذلك فان منظم الفولتية العملي هو ذلك الذي يوفق بين هذه المتطلبات المتضاربة والتي هي كما يلي : التنظيم . وأستجابة الدائرة المفتوحة . وأستقرارية الحالة المستقرة والاستجابة العابرة .

(أ) التنظيم : متطلبات تنظيم الفولتية لمنظومة النقل في المملكة المتحدة صارمة جدا حيث أنه قد تم تحديد التغير الاقصى في فولتية اطراف المولد بما لايزيد عن $\pm 0{\cdot}5\%$. التغيرات في خرج منظم الفولتية تكون نتيجة لاسباب تخص المنظومة والتشغيل كليهما . تغيرات المنظومة تنشأ نتيجة لتغيرات درجة الحرارة في قيم المكونات . والانحراف في تجهيزات الفولتية والمضخمات . واللاخطية في بعض المكونات مثل المضخمات المغناطيسية أووحدات التحكم المؤازرة . هذه التغيرات يمكن ازالتها بالتصميم الجيد والاختبار الدقيق للفرق المسموح به للمكونات . أما التغيرات التشغيلية فتنشأ نتيجة لظروف تغير الحمل والتي تحتاج الى فولتيات مجال مولد مختلفة .

ان الواجبات الأساسية لمنظم الفولتية هي مقارنة فولتية الاطراف V_t المقومة والمنعمة للمولد مع الاشارة المرجع V_r (فولتية مستمرة) المضبوطة مقدماً . ويضخم الفرق بين هاتين القيمتين وتسلط الفولتية المضخمة على ملفات مجال المولد . وقد يتألف المضخم من مضخمات مغناطيسية او مضخمات ثايرستور أومثير طيار d.c. يغذي مثير d.c. رئيسي اومثير a.c. مع مقومات .

ان معادلة الاثارة تحت ظروف الحالة المستقرة تكون على الشكل التالي

$$V_f = \mu(V_r - V_t)$$

حيث ان V_f هي الفولتية المسلطة الى ملفات مجال الدوار و μ هي الكسب الكلي لمنظومة الاثارة . من المفيد استعمال قيم نسبة الوحدة للفولتيات . وبذلك V_t = فولتية المولد المقننة = 1.0 بنسبة الوحدة ، و V_f = 1.0 بنسبة الوحدة = فولتية المجال التي تعطي فولتية المولد المقننة في حالة الدائرة المفتوحة . واذا تمت اثارة الماكنة بفولتية مرجع V_r فان $V_f = V_t$ في حالة الدائرة المفتوحة . لذلك

$$V_t = \mu(V_r - V_t)$$

$$V_t = V_r\left(\frac{\mu}{1+\mu}\right)$$

وهكذا فان V_t ستكون أقل بقليل من القيمة المرجع واذا كانت μ كبيرة جدا فان $V_t = V_r$ تقريباً .

وعندما تكون الماكنة عند الحمل المقنن فان فولتية المجال ستكون عدة امثال قيمتها في حالة الدائرة المفتوحة – نموذجياً 3 بنسبة الوحدة . وتحت هذه الظروف تعطينـــا معادلات الاثارة مايلي :

$$3 = \mu(V_r - V_t)$$

$$V_t = V_r - (3/\mu)$$

وهكذا فمن حالة اللاحمل الى حالة الحمل الكامل أنخفضت الفولتية بنسبـــة ($3/\mu$) . في المواصفات النموذجية يجب ان لايتعدى الانخفاض 1% (بمدى

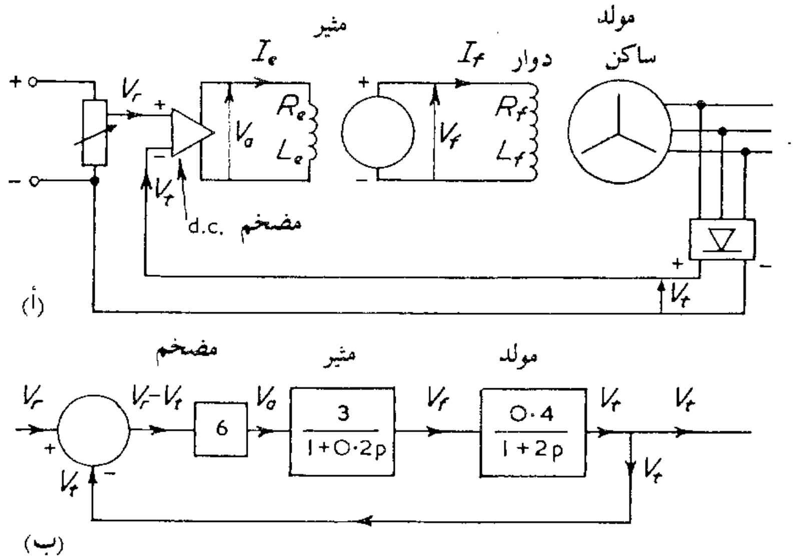
$\pm 0.5\%$) لذلك فان $\mu = 300$. ولذلك فعن طريق اختيار قيمة عالية بما فيه الكفاية للكسب من الممكن المحافظة على تغيرات فولتية التشغيل ضمن حدود موصوفة . وكما سيناقش فيما بعد فان الكسب العالي قد يسبب بعض المساوىء .

(ب) استجابة الدائرة المفتوحة : يجب ان يكون تصرف منظم الفولتية بصورة تكون فيها استجابته تحت ظروف الدائرة المفتوحة مخمدة جيداً وغير ميالة الى التذبذبات التي قد تضع فولتيات عالية على عازل ملف الساكن .

(ج) . استقرارية الحالة المستقرة : منظم الفولتية الجيد يجب ان يمكن المولد من الأشتغال المستقر عند زوايا حمل تتجاوز $90°$ بكثير (أنظر الجزء 1 شكل 7.21)

تمعن في الحالة البسيطة لمولد مفرد يجهز حملاً ستاتيكياً . الدائرة المكافئة (النموذج ج) يمكن ان تمثل بفولتية المجال V_f بنسبة الوحدة خلف مفاعلة وفولتية V_t عبر الحمل واذا أستعملنا فولتية مجال ثابتة فان التيار المسحوب من قبل الحمل سيتناسب مع فولتية الأطراف . كلما زيد تيار الحمل نتيجة لخفض ممانعة الحمل تهبط فولتية الاطراف نتيجة للمفاعلة التزامنية X_s . واذا استعملنا منظم فولتية لكي يسيطر على فولتية المجال فان تغيرات فولتية الاطراف ستقل كثيرا . التأثير يكون مشابها لحالة وجود مصدر فولتية ثابت مع مفاعله منخفضة جداً . ويمكننا ان نبين انمنظم الفولتية الكامل فعليا يقلل مفاعلة الماكنة من قيمتها المتزامنة الى قيمتها العابرة . لهذا فان الماكنة ستشتغل في الحالة الديناميكية .حتى تحت ظروف الحالة المستقرة يمكن ان تشتغل على منحنى الاستقرارية العابرة بصورة مستقرة وبزاويا حمل قد ترتفع الى حوالي $135°$ (أنظر الفقرتين 7.8 و 7.9 من الجزء 1) .

ان منظومة فولتية عملية لايمكن ان تعطينا استجابة لحظية لانها تحتوي على عناصر ذات اعاقة زمنيةخصوصا مجال المثير . لذلك فان هذا الاقصى النظري لايمكن ادراكه دائماً . وبصورة خاصة اذا كان لكسب المنظم μ قيمة عالية جدا فان ذلك قد يقود الى اللاأستقرارية حتى عند زوايا حمل منخفضة نسبيا . ولهذا السبب تم تطوير التقنيات لتحليل استقرارية الحالة المستقرة للمولدات المركب عليها منظمات فولتية .



شكل 3.9 النمط الاساسي لمنظم فولتية ومثير (أ) مخطط الدائرة (ب) مخطط كتلي لحلقة السيطرة .

شكل 3.9 (أ) يبين نمطاً أساسياً لمنظم فولتية . مع تغذية خلفية سالبة بسيطة . يجهز مجال مثير الـ d.c. . المطلوب ايجاد صيغة رياضية لنسبة الخرج / الدخل . او دالة أنتقال . لكل مركبة . ثم لمنظومة الاثارة الكلية . بالنسبة لمضخم الـ d.c. (مفترضين عدم وجود تعويق زمني) فان

$$v_a = G_a(v_r - v_t)$$

حيث أن G_a هي كسب المضخم . وبالنسبة لدائرة مجال المثير

$$v_a = R_e i_e + L_e(\mathrm{d}i_e/\mathrm{d}t)$$

أو بالنمط التشغيلي حيث سيستعاض عن p بـ $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$

$$v_a = (R_e + L_e\mathrm{p})i_e = R_e(1 + T_e\mathrm{p})i_e$$

حيث أن $T_e = L_e/R_e$ هي ثابت زمن دائرة مجال المثير .

وهكذا فان

$$\frac{i_e}{v_a} = \frac{(1/R_e)}{1 + T_e\mathrm{p}}$$

واذا أهملنا التشبع سنحصل على المعادلة التالية للمثير

$$v_f = k_e i_e$$

حيث ان k_e = انحدار منحنى التمغنط . لذلك فان دالة الانتقال للمثير بوصفها وحدة مفردة تكون

$$\frac{v_f}{v_a} = \frac{v_f}{i_e} \cdot \frac{i_e}{v_a} = \frac{G_e}{1+T_e\text{p}}$$

حيث أن $G_e = k_e/R_e$ وهي كسب المثير

وبالتشابه بالنسبة للمولد المتزامن فان

$$\frac{v_t}{v_f} = \frac{k_g/R_f}{1+T_f\text{p}} = \frac{G_g}{1+T_f\text{p}}$$

حيث ان k_g هي انحدار منحنى التمغنط و R_f هي مقاومة دائرة مجال الدوار و $T_f = L_f/R_f$ هو ثابت زمن دائرة مجال الدوار و $G_g = k_g/R_f$ هي كسب المولد .

ولكون المكونات تعاقبية فان حاصل ضرب نسب خرجها/ دخلها ستعطينا دالة انتقال حلقة متقدمة وكما يلي

$$\frac{v_t}{v_r - v_t} = \frac{G}{(1+T_e\text{p})(1+T_f\text{p})} \qquad [3.40a]$$

حيث ان G = الكسب الكلي = حاصل ضرب كسوب المكونات . وهكذا فان دالة الانتقال الكلية هي

$$\frac{v_t}{v_r} = \frac{G}{(1+T_e\text{p})(1+T_f\text{p})+G} \qquad [3.40b]$$

يجب ان نلاحظ ان كل عامل من العوامل الخطية في p في المقام ينشأ من المكونة التي يكون فيها معوق زمني بين التغير في الدخل والتغير الناتج في الخرج .

شكل 3.9 (ب) يبين المخطط الكتلي لمنظومة السيطرة : حيث أنه يبين سريان اشارات السيطرة (ليس سريان القدرة) . وبتعويض البيانات النموذجية المفترضة نحصل على :

$$\frac{v_t}{v_r} = \frac{18}{\text{p}^2 + 5{\cdot}5\text{p} + 20{\cdot}5} \qquad [3.40c]$$

المقام يعطي المعادلة المميزة (انظر الفقرة 3.6) وكما يلي

$$p^2+5\cdot5p+20\cdot5 = 0 \qquad [3.40d]$$

والتي تكون بالنمط التالي

$$p^2+2\zeta\omega_n p+\omega_n^2 = 0$$

ان التردد الطبيعي للتذبذب لمنظومة السيطرة هو $\omega_n = (20\cdot5)^{\frac{1}{2}} = 4\cdot52$ rad/s
أو $4\cdot52/2\pi = 0\cdot72$ Hz ونسبة الاخماد هي $\zeta = 5\cdot5/(2\times4\cdot52) = 0\cdot61$
والتي تشير الى اخماد منخفض قليلاً .

جذور المعادلة المميزة التي تعطي اقطاب دالة الانتقال هي

$$p = -2\cdot75 \pm j3\cdot59$$

والتردد المخمد للتذبذب يكون 3·59 rad/s أو 0·573 Hz وثابت الزمن يكون $1/2\cdot75 = 0\cdot363$ s .

المعادلة المميزة التربيعية أوالخطية تعطينا جذوراً لها جزء حقيقي سالب . اذا ستكون منظومة السيطرة مستقرة . معادلة مميزة تكعيبية أو أعلى قد يكون لها في الاقل جذر واحد ذو جزء حقيقي غير سالب وفي تلك الحالة ستكون منظومة القدرة غير مستقرة .

شكل 3.10 يبين مخططاً كتلياً لمنظم فولتية نموذجي من النوع المستعمل في العديد من المكائن القديمة فيه مضخمان مغناطيسيان ستاتيكيان موصولان بشكل تعاقبي وخرجهما يجهز مجال مثير .d.c أومثير .a.c ومقومات . وخرج المثير يغذي مجال المولد الرئيسي . كل مرحلة تضخيم تتميز بكسب وثابت زمن خاص بها . اي انه لمكون من النمط .

$$\frac{G}{1+Tp}$$

فاذا اخذنا المضخم المغناطيسي للمرحلة الاولى مثلا وكانت $G = 20$ و $T = 0\cdot05$ s فانه لدخل طفره 1 فولت سيرتفع الخرج أسيا الى 20 فولت كذلك فان زمن الارتفاع لـ 20 فولت سيكون 0·05 s اذا حافظنا على المعدل الابتدائي للأرتفاع .

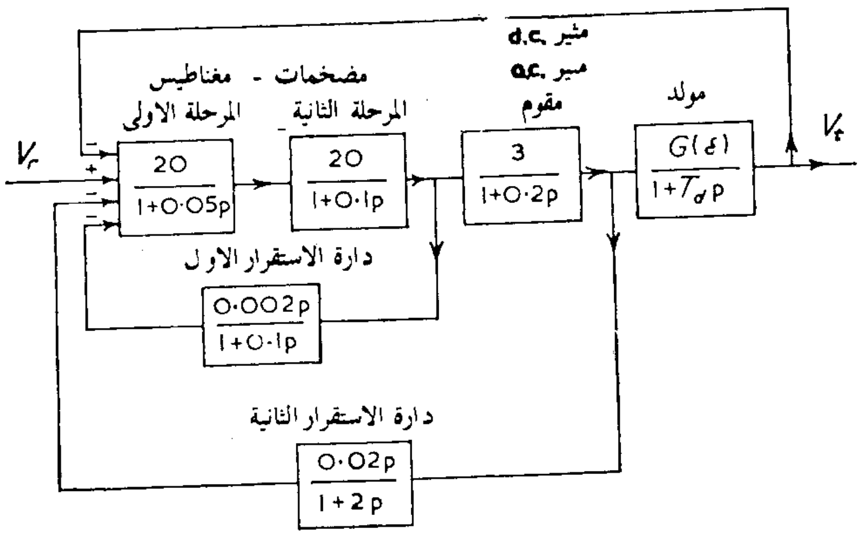
اذا أردنا تحسين الاستجابة الكلية فيجب أن نستعمل دارة أستقرار تغذي عكسيا جزءاً ضئيلاً من مشتقة الخرج . ويتكون منظم الفولتية الكامل من عدد من مثل هذه المضخمات ودارات الأستقرار. تم تبسيط المولد كثيراً في هذا المثال وهو يتميز بالكسب

المتغير $G(\delta)$ وهذه هي دالة لزاوية الحمل والحمل . وثابت زمن مجال دائرة قصيرة T_d قيمته النموذجية 2–1 ثانية .

يمكن أن تحلل أستقرارية مثل هذه المنظومة باستعمال قاعدة Routh– Hurwitz ويمكن أن نشتق دالة الانتقال الكلية لتكون على النمط التالي

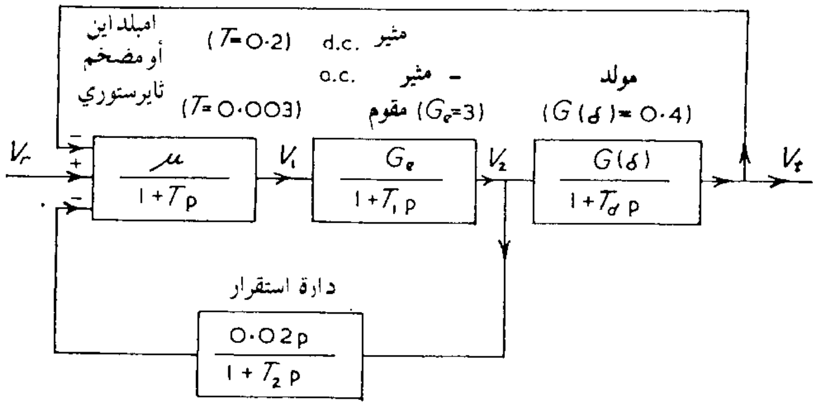
$$\frac{v_t}{v_r} = \frac{B_0 p^n + B_1 p^{n-1} + B_2 p^{n-2} + \dots + B_n}{A_0 p^m + A_1 p^{m-1} + A_2 p^{m-2} + \dots + A_m} \quad [3.41]$$

حيث أن المعاملات هي دوال لمعالم الماكنة ومنظم الفولتية . ان مقام هذه الدالة هو المعادلة المميزة وقد تم تطبيق قاعدة Routh–Hurwitz على معاملات هذه المعادلة . وبهذه الطريقة يمكن تخطيط زاوية الحمل المسموح بها العظمى بوصفها دالة للحمل ومعالم المنظم .



شكل 3.10 مخطط كتلي لمنظمات نوع 4 و 5 (انظر القائمة قرب نهاية الفقرة 3.8.2) .

وللمنظم المبين في شكل 3.11 مثلا . نحصل على دالة الانتقال كما يلي :



شكل 3.11. مخطط كتلي للمنظمات نوع 7, 6,3

$$v_1 = \left\{v_r - v_t - \left(\frac{0{\cdot}02\text{p}}{1+T_2\text{p}}\right)v_2\right\}\frac{\mu}{1+T\text{p}}$$

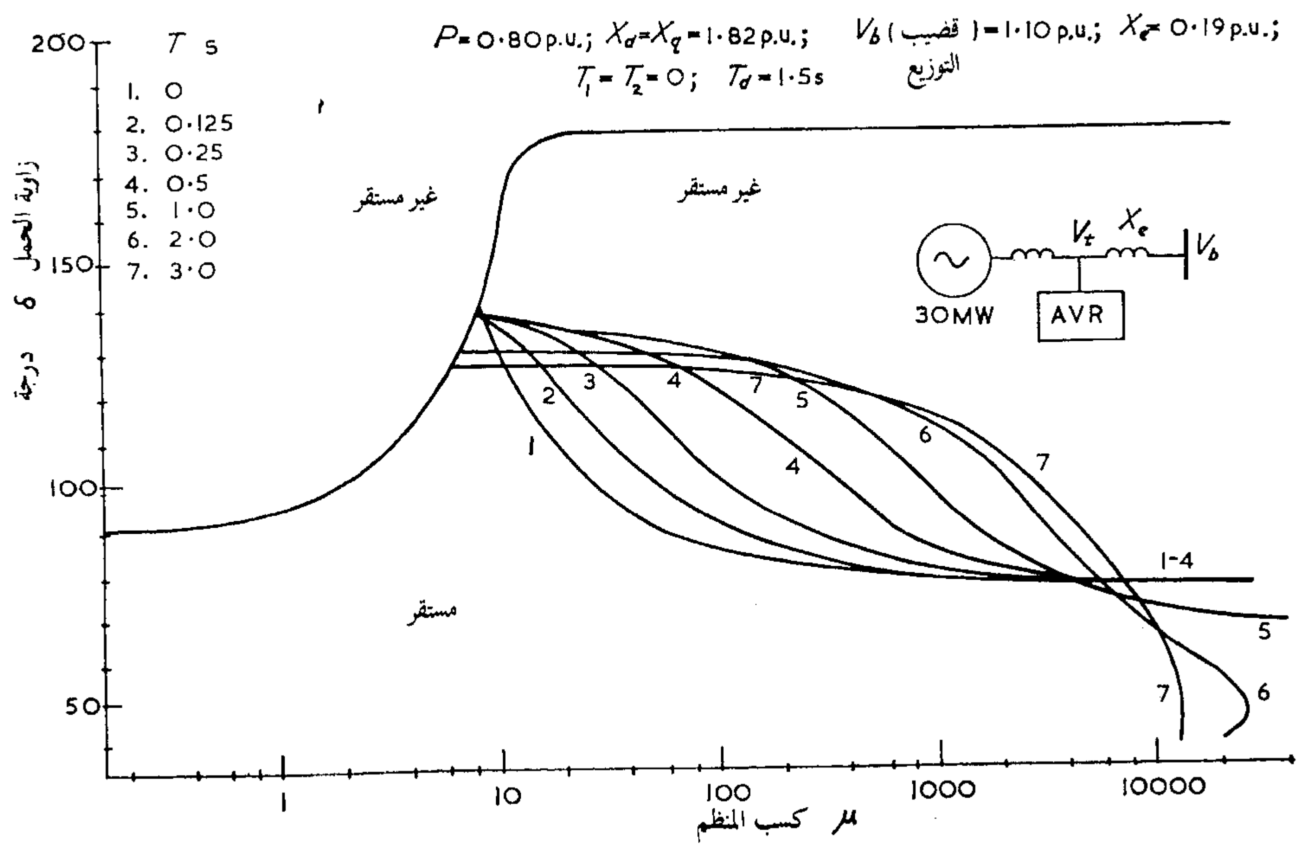
$$v_2 = \left\{\frac{G_e}{1+T_1\text{p}}\right\}v_1$$

$$v_t = \left\{\frac{G(\delta)}{1+T_d\text{p}}\right\}v_2$$

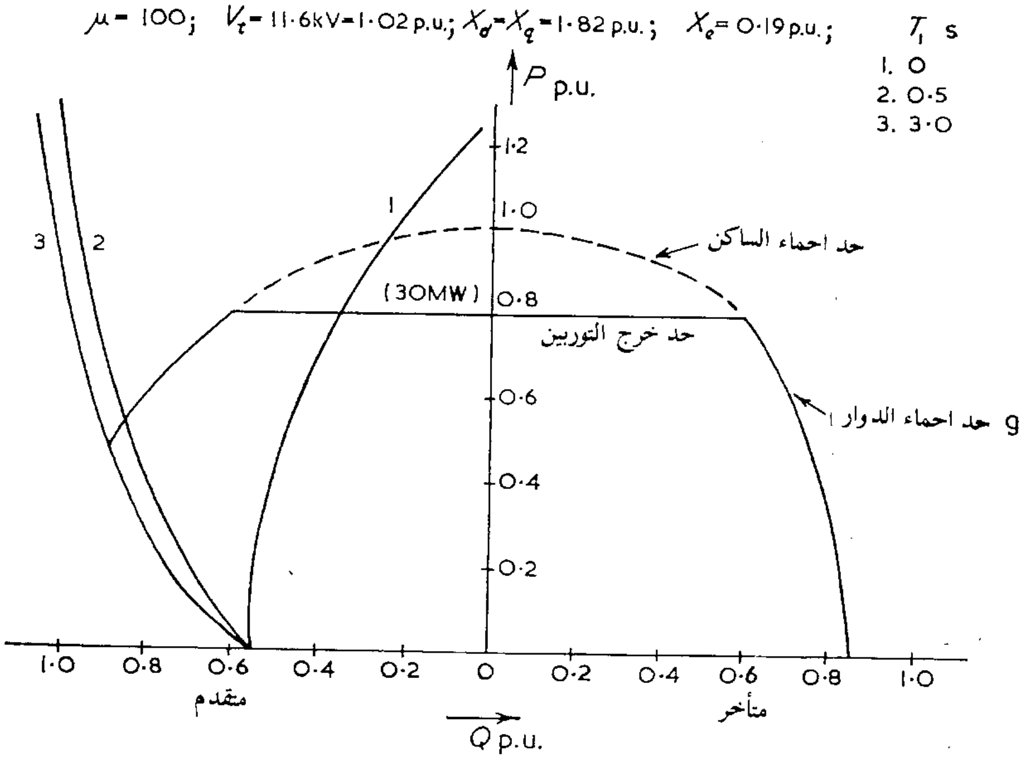
وبعد اجراء بعض الاختزالات الجبرية نحصل على

$$\frac{v_t}{v_r} = \frac{\mu G_e G(\delta)(1+T_2\text{p})}{(1+T\text{p})(1+T_1\text{p})(1+T_2\text{p})(1+T_d\text{p}) + \mu G_e G(\delta)(1+T_2\text{p}) + 0{\cdot}02\mu G_e\text{p}(1+T_d\text{p})} \quad [3.42]$$

جذر البسط يعطينا صفر دالة الانتقال . وجذور المقام بعد اختزالها الى معالة متعددة الحدود في أ تعطينا الاقطاب . لهذا يمكننا بحث أستقرارية منظومة السيطرة.



شكل 3.12 المحل الهندسي لاستقرارية مولد مع منظم فولتية



شكل 3.13 مخطط بياني لاداء المولد

حدود الاستقرارية لنمط مبسط من هذا المنظم مبينة في شكل 3.12 عندما $T = 0$ و $T_2 = 0$ و $T_d = 1·5$ s ولقيم مختلفة من T_1 . وعند التمعن في منسوب 30-MW بحمل كامل يمكننا أن نرى أنه لكسوب منظم عالية نحتاج الى ثابت زمن منظم عالٍ T_1 للمحافظة على الأستقرارية عند زوايا حمل عالية . يمكننا أن نحصل على زوايا °140 –°130 فقط مع ثوابت زمن منخفضة اذا كان كسب المنظم منخفضاً (الكسب النموذجي 20–5 وبعد القيام بدراسات مشابهة عند احمال مختلفة من الممكن تخطيط حد الأستقرارية على المخطط البياني لأشتغال الماكنة .

شكل 3.13 يبين مخططات لكسب منظم مقداره 100 ويبين كيف أن ثابت زمن منظم صغير سيزيد كثيراً من حدود الأستقرارية .

(د) الاستجابـــة العابـــرة

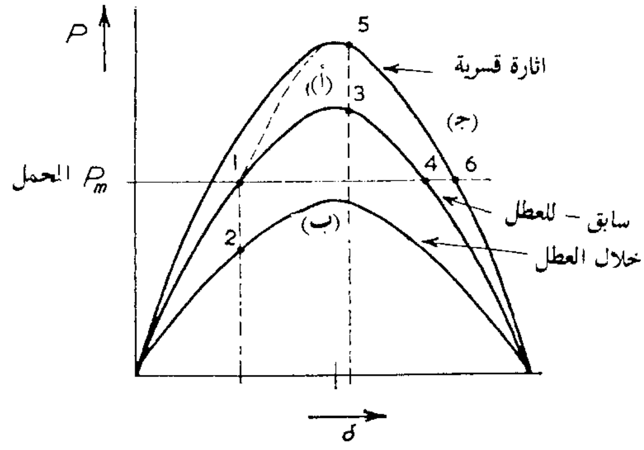
من المحبذ زيادة الأثارة بصورة عاجلة تحت ظروف عطل المنظومة قدر المستطاع بحيث أن القدرة التزامنية القصوى ستكون متوفرة عند أزالة العطل لمنع فقدان الأستقرارية .

فمثلاً لو أخذنا شكل 3.14 فان المنحنى (أ) يبين علاقة القدرة المتزامنة / زاوية الحمل للظروف السابقة للعطل مع اشتغال المولد عند النقطة 1 . وخلال العطل (المنحنى (ب)) سيعجل الدوار . فبدون السيطرة على الاثارة بعد ازالة العطل ستعود نقطة اشتغال المولد الى المنحنى (أ) عند النقطة (3) (على فرض عدم وجود تغيير في مفاعلة الانتقال) . على أن التعجيل الامامي هو في حالة تباطؤ الان فانه قد يأخذ نقطة الاشتغال الى ما بعد النقطة 4 التي عندها يبدأ المولد بالتعجيل مرة اخرى وقد يفقد تزامنه . من ناحية أخرى اذا استعملنا سيطرة اثارة قسرية فان نقطة الاشتغال ستكون النقطة 5 على المنحنى (ج) والتأرجح في هذه الحالة سيكون محدوداً بالنقطة 6 . عند النقطة 5 تكون قدرة التباطؤ اكبر بكثير وفرص فقدان التزامن ستكون أقل . ان امكانية منظومة الاثارة على الدفع بعجالة بحيث نتمكن من الحصول على منحنى استعادة مشابه لذلك الذي في (ج) تعتمد الى حد كبير على التعويقات في دائرة المنظم . لذلك فمن المرغوب فيه جداً تقليل هذه التعويقات الى حدها الادنى للحصول على استجابة عابرة مثلى .

أنواع منظم الفولتية :

بينت الفقرات السابقة كيف أن تصميم المنظم يتأثر باحتياجات الأداء وكيف أن هذا سيقود الى تضارب ، اي أن التعويقات تكون مفيدة لاستقرارية الحالة المستقرة ولكنها غير مرغوب فيها للأستقرارية العابرة بينما الكسب العالي يكون جيداً للمنظم ولكنه غير مرغوب فيه لاستقرارية الحالة المستقرة . ان هدف تطوير المنظمات على مدى السنين هو تقليل هذه التضاربات . وندرج في ادناه ترتيب منظومات الاثارة حسب مرتبتها الزمنية تقريباً .

1 . مثيرات .D.C ذات سيطرة مجال يدوية .
2 . مثيرات .D.C ذات منظمات كهروميكانيكية .
3 . مثيرات .D.C ذات سيطرة بالأميلداين
4 . مثيرات .D.C ذات سيطرة بالمضخم المغناطيسي .
5. مثيرات .A.C ذات سيطرة بالمضخم المغناطيسي ومقومات ثنائية ستاتيكية .
6. مثيرات .A.C ذات سيطرة مجال بالثايرستور ومقومات ثنائية ستاتيكية .
7. مثيرات .A.C ذات سيطرة مجال بالثايرستور ومقومات ثنائية دواره .



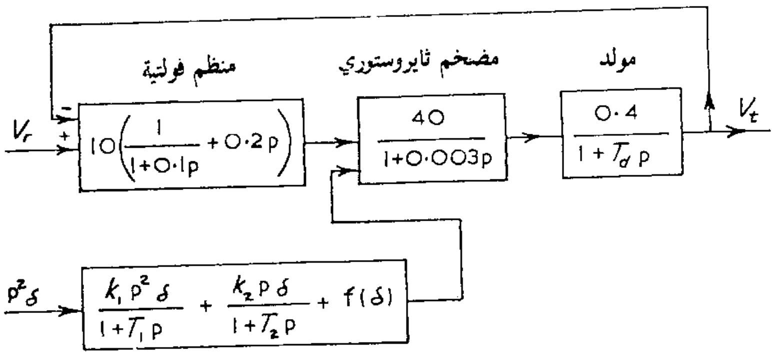
شكل 3.14. توضيح تاثير قسر المجال.

8. مثيرات ثايرستور ستاتيكية .
9. مثيرات A.C. ذات ثايرستورات دواره .

السيطرة اليدوية على المجال تم ابطالها بسرعة باستعمال المنظمات الكهروميكانيكية والتي بقيت في الخدمة لسنين عديدة ولكنها حسنت انتظام الفولتية فقط ولم تحسن الاستقرارية الداینامیکیة . منظمات الأميلداين والمضخمات المغناطيسية لمثيرات الـ d.c. كانت متعاصرة فعلاً ولكنها عانت من التأخيرات الزمنية واحتاجت الى حلقات تثبيت (الشكلين 3.10 و 3.11).

لقد تم ابدال مثيرات الـ d.c. بمثيرات a.c. ومقومات ستاتيكية في المنوبات 500 ميكاواط و660 ميكا واط في المملكة المتحدة للحصول على محاسن عديدة . فقد تم تقليل ثابت زمن المثير من حوالي 3 ثوانٍ الى حوالي 0·1 ثانية وتم كذلك ازالة مصاعب التعديل للمكائن الكبيرة الحجم التي تشتغل بسرعة 3000 دوره في الدقيقة وتقليل الطول الكلي لمنوب توربيني . وحديثاً تم تطوير منظومة لها مثير ذو منتج دوار لمجموعات الـ 660 ميكا واط والتي ليس لها فرشاة ولها ثنائيات مركبة على عمود الادارة .

اختراع ثايرستورات القدرة مكن من ازالة ثابت زمن مجال المثير ، واصبحت منظومات التقويم الثايرستورية – الستاتيكية المغذاة بمحول تزداد شيوعاً . ان احدى محاسن مثل هذه المنظومات هو أن تعويقاتها المتأصلة تكون قليلة جداً ومنظم الفولتية يمكن أن يصمم ليعطي



شكل 3.15 مخطط كتلي لمنظمات نوع 8 و9

أداء مثالياً واحدة من مثل هذه المنظومات مبينة في شكل 3.15 . تم استعمال كسب عالٍ للمحافظة على تنظيم جيد وتم وضع تعويق في قناة الفولتية لضمان اداء حالة مستقرة جيدٍ مع كسب عالٍ . وتم الحصول على اداء عابر جيد باستعمال مشتقات زاوية الحمل δ التي تغذي الى المضخم الثايرستوري بصورة مستقلة من قناة الفولتية . وهكذا يمكن استعمال بقية الاشارات، عدا اشارات الفولتية ، بفائدة مع منظومة الاثارة الثايرستورية لانها لم تتشوه بالتعويقات في المثير. التوسع الطبيعي لهذه المنظومة هو استعمال ثايرستورات مركبة على عمود الادارة وترتيبات بدون فرشاة كاملة . العمل جار على تطوير هذا النوع منذ فترة وقد تم اجراء نصب تجريبي حالياً على منوب 60 ميكا واط .

3.8.3 متحكمات التوربين TURBINE GOVERNORS

تم استعمال المتحكمات في السابق لضمان درجة من استقرارية الحالة المستقرة لمنظومات القدرة تحت ظروف تغير الحمل ولمنع السرعة المفرطة خلال ظروف الافلات الاضطرارية (رفع الحمل) .

التغيرات في الحمل على منظومة القدرة تنتج تغيرات في التردد يجب الحد منها عن طريق تغيير التوليد المربوط الى المنظومة . واذا ازداد الحمل فجأة فان التردد سيهبط مالم تحقن الزيادة في الحمل الى المنظومة . الهبوط العاجل جدا في التردد قد يسبب عدم استقرارية واخفاق المنظومة . وتكون تغيرات التردد اسرع من ان يمكن السيطرة عليها بوساطة تغييرات يدوية في التوليد لوحده لذلك فان لمتحكم كل مولد توربيني

خاصية انخفاض والتي تغير قدرة التوليد تلقائيا كلما حصل تغيير في تردد المنظومة . الانخفاض النموذجي هو 4% . لذلك فان هبوط 4% في تردد المنظومة سيفتح متحكم المنظومة للمنوب من موقع اللاحمل الى موقع الحمل الكامل . هذا الانخفاض يمكن ان يمثل بالمعادلة

$$P_G = P_S - \frac{25(f-f_0)P_R}{f_0} \qquad [3.43]$$

حيث ان P_G هي دخل القدرة لجريان البخار
P_R هي القدرة الخارجة المقننة
P_S هي تنظيم مجموعة مفاتيح تسريع المتحكم
f و f_0 هما التردد اللحظي والاساس للمنظومة على التوالي

شكل 3.16 يبين تمثيلا تخطيطيا لتوربين مع متحكم . تتم السيطرة فيه على جريان البخار من المرجل بوساطة وحدة مؤازرة صمام المتحكم والتي لها زمن تعويق T_s بحيث ان جريان البخار P_H الى اسطوانة الضغط العالي يكون

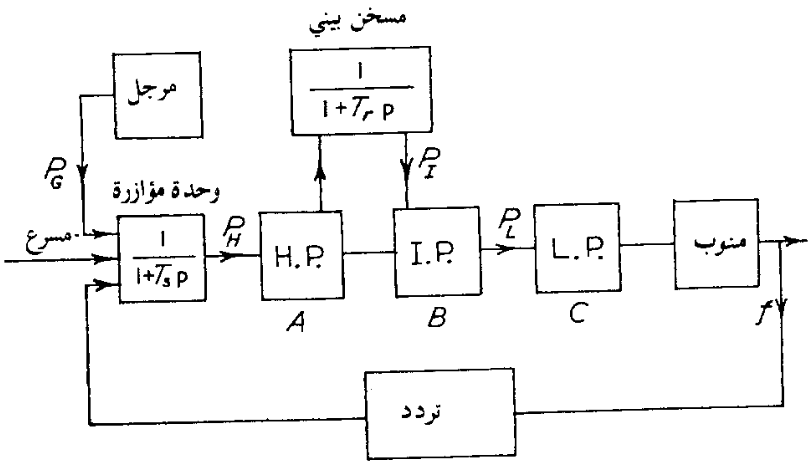
$$P_H = \frac{P_G}{1+T_s\text{p}}$$

جزء ضئيل من القدرة الخارجة الميكانيكية AP_H سيتولد في قسم الضغط العالي H.P. عند جريان البخار الى المسخن البيني ، الذي سيؤلف تعويق T_r ذا رتبة 15–10 ثانية . جريان بخار الاسطوانة المتوسطة لذلك سيكون

$$P_I = \frac{P_H}{1+T_r\text{p}}$$

وسيتولد جزء ضئيلا BP_I من القدرة الخارجة .

يجري البخار بصورة مستقيمة الى قسم الضغط الواطيء من قسم الضغط المتوسط لذلك فان $P_L = P_I$. القدرة الخارجة الميكانيكية المتبقية CP_L ستتولد في قسم الضغط الواطيء بحيث أن $A+B+C = 1$.
القدرة الخارجة الميكانيكية الكلية هي :



شكل 3.16 مخطط كتلي لمجموعة مولد توربيني

$$\begin{aligned}
P_m &= AP_H + BP_I + CP_L \\
&= AP_H + (B+C)P_I \\
&= AP_H + (1-A)P_I \\
&= AP_H + \left(\frac{1-A}{1+T_r\mathrm{p}}\right)P_H \\
&= P_H\left(\frac{1+AT_r\mathrm{p}}{1+T_r\mathrm{p}}\right) \\
&= \frac{P_G(1+AT_r\mathrm{p})}{(1+T_r\mathrm{p})(1+T_s\mathrm{p})} \\
&= \frac{1+AT_r\mathrm{p}}{(1+T_r\mathrm{p})(1+T_s\mathrm{p})}\left[P_S - \frac{25(f-f_0)}{f_0}P_R\right]
\end{aligned} \quad [3.44]$$

هذه المعادلة تبين كيف ستستجيب القدرة الميكانيكية الى تغير منظم مجموعة مفاتيح المسرع أو في تردد المنظومة .

المتحكم الالكتروني هو التطوير الأكثر حداثة في تصميم المتحكم . في هذا النوع يساق صمام المتحكم كهربائياً ويسيطر عليه باشارات الكترونية وبذلك يقلل ثابت زمن وحدة المؤازرة T_s وتحسن الأستجابة . بهذه الطريقة يمكن ان تشمل اشارات التعجيل اضافة الـى اشارات السرعة في سيطرة المتحكم التي يمكن أن تحسن الاستقرارية العابرة عن طريق غلق البخار خلال العطل . لسوء الحظ حوالي 50% من القدرة الميكانيكية تنتج

في اسطوانة الضغط العالي ($A = 0{\cdot}5$) وعلى أن تلك يمكن السيطرة عليها بصورة عاجلة جداً الا أن تغيرات قدرة الضغط المتوسط والضغط الواطيء ستعيقها الطاقة المخزونة في ذراع المسخن البيني لذلك فان السيطرة الكاملة على قدرة البخار تكون صعبة جداً . هناك طريقة واحدة للتغلب على هذه المشكلة هي أن يتم التحكم بصمامات جهاز الاعتراض في حلقة المسخن البيني . وقد اشتملت احدث التصاميم للمكائن ذات المتحكمات الالكترونية على هذه الخاصية .

المراجع

BROWN, *et al.* 1970. Effects of excitation, turbine energy control and transmission on transient stability. *I.E.E.E. Trans.* **PAS-89,** 1247–1251.

COLES, H. E. 1965. Effects of prime-mover governing and voltage regulation on turboalternator performance. *Proc. I.E.E.* **112,** 1395–1405.

COLES, H. E. 1968. Dynamic performance of a turboalternator utilising 3-term governor control and voltage regulation. *Proc. I.E.E.* **115,** 266–279.

DEMELLO, F. P. & CONCORDIA, C. 1969. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *I.E.E.E. Trans.* **PAS-88,** 316–329.

DINELEY, J. L. & KENNEDY, M. W. 1964. Influence of governors on power-system transient stability. *Proc. I.E.E.* **111,** 98–106.

FITZGERALD, A. E. & KINGSLEY, C. 1961. *Electric Machinery.* McGraw-Hill.

FRIEDLANDER, E. 1966. Static network stabilisation. *G.E.C. Journal* **33,** 58.

GOVE, R. M. 1965. Geometric construction of the stability limits of synchronous machines. *Proc. I.E.E.* **112,** 977–985.

HO, K. W. 1964. Graphical method for solving transient stability problems. *Proc. I.E.E.* **111,** 335–342.

HUMPAGE, W. D. & STOTT, B. 1964. Effects of autoreclosing circuit breakers on transient stability of e.h.v. transmission systems. *Proc. I.E.E.* **111,** 1287–1298.

JACOVIDES, L. J. & ADKINS, B. 1966. Effect of excitation regulation on synchronous-machine stability. *Proc. I.E.E.* **113,** 1021–1034.

KABRIEL, B. J. 1970. Choosing power-system voltage-regulator parameters by use of standard forms. *Proc. I.E.E.* **117,** 1809–1814.

KABRIEL, B. J. & EVANS, F. J. 1969. Simple formulae for voltage-regulator gains for best alternator stability. *Proc. I.E.E.* **116,** 1907–1914.

KANEFF, S. & AKHTAR, M. Y. 1970. Influence of synchronous-machine rotor angular-velocity variations in transient-stability studies. *Proc. I.E.E.* **117,** 1675–1682.

KIMBARK, E. W. 1969. Improvement of power system stability by changes in the network. *I.E.E.E. Trans.* **PAS-88,** 773–781.

LOKAY, H. E. & BOLGER, R. L. 1965. Effect of turbine generator representation in system stability studies. *I.E.E.E. Trans.* **PAS-84,** 933–942.

O'KELLY, D. 1970. Steady-state power/rotor-angle characteristic for synchronous machine including hysteresis. *Proc. I.E.E.* **117,** 1683–1690.

OLIVE, D. W. 1966. New techniques for the calculation of dynamic stability. *I.E.E.E. Trans.* **PAS-85,** 767–777.

PATCHETT, G. N. 1970. *Automatic Voltage Regulators and Stabilizers.* Pitman.

SHACKSHAFT, G. 1970. Effect of oscillatory torques on the movement of generator rotors. *Proc. I.E.E.* **117,** 1969–1974.

STROEV, V. A. & SREEDHRAN, R. 1967. Steady-state stability of alternators as affected by voltage regulators. *Proc. I.E.E.* **114,** 939–945.

SURANA, S. L. & HARIHARAN, M. V. 1968. Transient response and transient stability of power systems. *Proc. I.E.E.* **115,** 114–120.

B.S. 2658: Guide to terms used in a.c. power system studies.

B.S. 4296: Methods of test for determining synchronous machine quantities.

مسائل

1. مجموعتا محول مولد تم ربطهما بمغذي رابط 132 كيلوفولت ذي دائرة مفرده . مفاعلات المنظومة الكلية (قبل العطل) هي $j30 = X_0/2 = X_2 = X_1'$ أوم / طور والقوى الدافعة الكهربائية لكلا المصدرين هي 132 كيلو فولت ويمكن ان نفرض أنها ستبقى ثابتة . كلا المصدرين مؤرضين مباشرة ويمكن اهمال مقاومة المنظومة . اذا حدث عطل عند ثلثي المسافة من نهاية الارسال فأحسب مفاعلات الأنتقال خلال كل من الأعطال التالية : عطل ارضي . عطل طوري . عطل مزدوج أرضي . عطل ثلاثي الطور . خطط منحنيات القدرة / الزاوية المناظرة ومن ضمنها تلك الخاصة بالظرف السابق للعطل ودون ملاحظاتك عنها .

(75 , 60,40 Ω/ph) (L.P.)

2. ثلاث مجموعات محول مولد A و B و C لها مفاعلات داخلية 0·3 و 0·4 و 0·5 بنسبة الوحدة على التوالي . الروابط المغذية الحلقية AB و BC و CA لها مفاعلات 0·6 و 0·7 و 0·8 بنسبة الوحدة على التوالي . كل القيم التي بنسبة الوحدة هي على الأساس نفسه . احسب مفاعلات الانتقال لدائرة قصيرة بين زوجين المولدات A–B و B–C و C–A .

(1·971, 2·237, 1·542 p.u.) (L.P.)

3. مجموعة محول مولد ثلاثية الطور مربوطة الى قضيب توزيع لانهائي عبر خطين مزدوجين (خطين متماثلين على التوازي) وحد استقرارية الحالة المستقرة هو 200 ميكا واط . تم تقليل هذا الحد الى 70 ميكا واط خلال دائرة قصيرة ثلاثية الطور في منتصف مسافة أحد الخطين . احسب المفاعلة بنسبة الوحدة (اهمل المقاومة) على اساس 100 ميكا فولت أمبير للمحول المولد ولكل خط . وحد القدرة عند عزل الخط العاطل . ماالافتراض المعقول الذي يجب أن يتم فيما يخص القوى الدافعة الكهربائية للمنظومة ؟

(175 MW, 0·1429 , 0·4286 p.u.) (L.P.)

4. منطقة مستلمة للقدرة تحتاج الى 25ميكا واط تأخذ ها من قضيب توزيع لانهائي عبر مغذ رابط . حد القدرة للحالة المستقرة هو 80ميكاواط . باستعمال قاعدة المساحة المتساوية . قدر حمل المنطقة الأضافي الأقصى الذي يمكن أن نضيفه

فجأة بدون فقدان استقرارية المنظومة . استعمل واكتب أية فرضيات ضرورية جرب طريقة تكرارية لتحسين دقة الجواب المقدر

(40·5 MW) (L.P.).

5 . حدث عطل على منظومة تتألف من مولد ذي دوار اسطواني كبير يغذي قضيب توزيع لانهائـي خلال منظومة نقل . مفاعلات الأنتقال بين المولد وقضيب التوزيع قبل العطل . وخلاله . وبعده هي 0·4 و 1·1 و 0·5 بنسبة الوحدة على التوالي أهمل مقاومة المنظومة . احسب زاوية ازالة العطل الحرجة اذا كان أنتقال الحمل فـي زمن حدوث العطل هو 0·8 بنسبة الوحدة . خطط منحنيات القدرة / الزاوية وبين تساوي مساحات التعجيل والتباطؤ .

(116°) (L.P.)

6 . وحدة محول مولد 150 ميكافولت أمبيرلها مفاعلة كلية 0·3 بنسبة الوحدة تسلم قدرة مقدارها 150 ميكا واط الى قضبان توزيع لانهائية عبر خط 220 كيلو فولت ذي دائرة مزدوجة له ممانعة لكل طور لكل دائرة مقدارها j100 أوم . حدث عطل ثلاثي الطور في منتصف مسافة أحد خطوط النقل . احسب زاوية التأرجح القصوى التي قد يصلها المولد قبل ازالة العطل وبدون فقدان الاستقرارية .

(90°) (I.E.E.)

7 . مفاعلات الأنتقال بيـن مولـد وقضيـب توزيـع لانهائي . يشتغـل بفولتيـة 132 كيلوفولت . قبل حدوث العطل . وخلاله . وبعده على المغذي الرابط هي :

قبل حدوث العطل	140	أوم لكل طور
خلال فترة السطل	385	أوم لكل طور
بعد ازالة العطل	175	أوم لكل طور

اذا تمت ازالة العطل عندما كانت زاوية المولد قد تقدمت بمقدار 80 درجة كهربائية عن موضعها المستقر قبل حدوث العطل فحدد الحمل الأقصى الذي يمكن أن تحمله بدون أن يتسبب العطل في عدم استقرارية المنظومة .

(52·4 MW) (I.E.E.)

8 . منوب توربيني ذوقطبين ، 11·5 كيلوفولت ، 50 هيرتز له قدرة مقننة 60 ميكاواط وعامل قدرة متأخر مقداره 0·85 . دواره له عزم قصور ذاتي 8800 كغم . م^2 . أحسب قصورة الذاتي-H بالميكاجول ميكافولت أمبير وزخمه بالميكاجول ثانية درجة كهربائية .

(6·15, 0·0483) (L.P.)

9. محطة قدرة A لها ست مجموعات مولد متشابهة تماماً كل منها مقنن عند 60 ميكافولت أمبير وله ثابت قصور ذاتي 6 ميكاجول / ميكافولت أمبير : البيانات المناظرة لمحطة ثانية B هي 5 مجموعات كل منها 200 ميكافولت أمبير و 2 ميكاجول / ميكافولت أمبير . اذا كانت المحطتان متجاورتين وتقعان عند احدى نهايتي خط رابط طويل (مغذ رابط) فأحسب ثابت القصور الذاتي للمجموعة المكافئة المفردة على الأساس 100 ميكافولت أمبير .

(41·6 MJ/MVA) (L.P.)

10. مولد – توربيني ذو أربعة أقطاب . 50 هيرتز مقنن عند 45 ميكاواط له عامل قدرة متأخر 0·8 وله عزم قصور ذاتي 25 000 كغم . م^2 . تم ربط هذا المولد عبر منظومة نقل الى مجموعة أخرى بياناتها المناظرة هي قطبان . 50 هيرتز . 60 ميكاواط . 0·85 متأخر . 9000 كغم . م^2 . أحسب ثابت القصور الذاتي لكل مجموعة على أساسها المقنن وثابت القصور الذاتي لمجموعة مكافئة مفردة مربوطة الى قضيب توزيع لانهائي وعلى الأساس المقنن 100 ميكافولت أمبير .

(2·07, 6·29, 5·48 MJ/MVA) (L.P.)

11. مجموعة مولد – توربيني لها زخم مقداره 0·01 ميكاجول ثانية / درجة كهربائية ولها خرج قدره 50 MW الى قضيب توزيع لانهائي عبر منظومة مغذ رابط عديم الفقد حد قدرته للحالة المستقرة هو 100 ميكاواط . عند فصل قسم من المغذي الرابط يقل حد القدرة الى 60 ميكاواط . قدر ازاحة الزاوية النسبية للمنوب . نسبة الى قضيب التوزيع اللانهائي . عند نهاية الفترتين الفاصلتين الأوليتين (كل منها 50 ملي – ثانية) مباشرة بعد حدوث الفصل .

(39·5°, 32·5) (L.P.)

12. ماكنة مفردة مقننة عند 500 ميكافولت أمبير . 50 هيرتز تمت اثارتها الى 455 كيلو فولت (على المستوى 400 كيلو فولت وخلف مفاعلتها العابرة) . لها ثابت قصور ذاتي مقداره 2 ميكاجول ، ميكافولت أمبير قد تم تحميلها الى 450 ميكاواط وتم ربطها الى قضيب توزيع لانهائي 400 كيلوفولت عبر مغذ رابط . مفاعلة الانتقال للمنظومة هي 10٪ قبل حدوث العطل و 20٪ خلال فترة العطل و 15٪ بعد ازالة العطل وكلها محسوبة على الأساس 100 ميكافولت أمبير . قدر زاوية الدوار في نهاية الفترات الفاصلة الثلاث الأولية التي كل منها تساوي 0·075 ثانية . أفرض أنه تمت ازالة العطل بعد 0·15 ثانية .

(57·72°, 43·52, 29·0) (L.P.)

13. مولد 50 ميكافولت أمبير . 50 هيرتز له زخم مقداره 0·05 ميكاواط (ثانية ^{2}) / درجة كهربائية ومحمل الى 0·8 بنسبة الوحدة . تم ربط المولد الى قضيب توزيع لانهائي بحيث أن حدود القدرة للحالة المستقرة قبل حدوث العطل وخلاله وبعده هي 1·6 و 0·2 و 1·2 بنسبة الوحدة على التوالي . قدر زاوية الحمل عند نهاية كل من الفترات الفاصلة الأربع الأول التي كل منها تساوي 0·1 ثانية . أفرض أنه تمت أزالة العطل بعد 0·25 ثانية . كل القيم بنسبة الوحدة مأخوذة على الأساس المقنن 50 ميكافولت أمبير .

(75·43°, 60·91, 43·9, 33·5) (L.P.)

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفصل الرابع

الموجات المنتقلة في خطوط النقل

TRAVELLING WAVES IN TRANSMISSION LINES

4.1 المقدمــــة

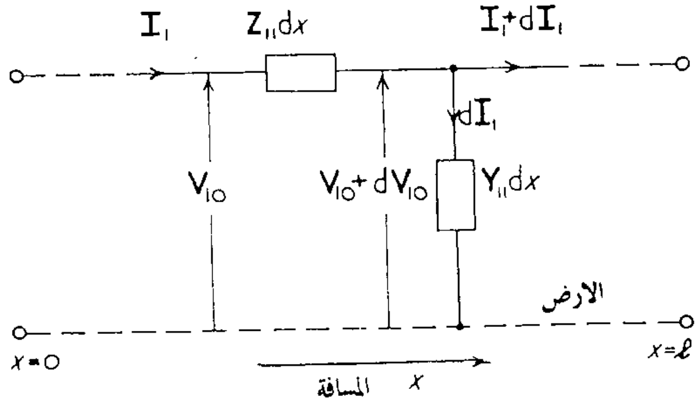
في نظرية الدائرة المتضامة . تم الافتراض ان التغيرات في الفولتية والتيار بسبب اضطراب في احد اجزاء الشبكة تحدث بصورة آنية مع تلك التي في كل اجزاء الدائرة الاخرى . هذا لايدل طبعا على ان التغيرات ستكتمل مرة واحدة . بل لايعني سوى ان التغيرات تبدأ بالحدوث في اللحظة نفسها التي سيبدأ فيها الاضطراب وانه بعد فترة عابرة سنصل الى ظرف الحالة المستقرة . وهذا يكافيء الافتراض ان حجم الدائرة صغير الى حد الاهمال وان الاضطراب سيتحرك الى الدائرة عامة بسرعة لانهائية . بما ان الاخيرة (السرعة اللانهائية) لايمكن ان تتجاوز سرعة الضوء $c = 3 \times 10^8\ ms^{-1}$ فان الزمن المستغرق لاضطراب معين للانتشار على طول خط النقل يكون مهما وتمثيل الخط بدائرة « متضامة » يكون غير مناسب الا لاغراض محدودة معينة .

في الفقرة 1.3.2 من الجزء الاول تم التبصر في حالة موصل مفرد مع مستوارضي لانهائي قريب وتم حل المعادلات التفاضلية لخط موزع المعالم وتمت دراسة ظروف تردد تجهيز مختلفة . الموجات الامامية (او الساقطة) والخلفية (او المنعكسة) تمت الاشارة اليها بصورة مختصرة في الفقرة 1.3.6 . ولكي يمكننا تطوير مناقشة الامواج المنتقلة بصورة اوسع من الضروري ان نراجع في الفقرة التالية الحالة نفسها لموصل واحد ومستو ارضي باقصى اختصار ممكن

4.2 خط ذو موصل مفرد مع مستوٍ ارضي قريب :

Single conductor line with nearby earth plane

في دائرة الشكل 4.1 . Z_{11} و Y_{11} يمثلان الممانعة الذاتية المتوالية والمسامحة المتوازية لـكل وحدة طول من الموصل المفرد . V_{10} هي الفولتية بين الموصل عند نقطة معينة والمستوي الارضي بحيث ان V_{10} تمثل ج.م.ت فولتية الطور لتردد معين على خط ثلاثي الطور متوازن كامل . من الشكل 4.1



شكل 4.1 جزء صغير من خط

$$\frac{dV_{10}}{dx} = -Z_{11}I_1 \qquad [4.1]$$

$$\frac{dI_1}{dx} = -Y_{11}V_{10} \qquad [4.2]$$

بحيث ان

$$\frac{d^2V_{10}}{dx^2} = Y_{11}Z_{11}V_{10} \qquad [4.3]$$

$$\frac{d^2I_1}{dx^2} = Y_{11}Z_{11}I_1 \qquad [4.4]$$

وحل المعادلة [4.3] يكون

$$V_{10} = a\,e^{\gamma_{11}x} + b\,e^{-\gamma_{11}x} \qquad [4.5]$$

حيث ان

$$\gamma_{11} = \sqrt{(Y_{11}Z_{11})} = \alpha_{11} + j\beta_{11} \qquad [4.6]$$

a و b هي ثوابت اختيارية . كما بينا في الفقرة 1.3.6 من الجزء 1 . وهما مطاوران لفولتية ذات تردد مفرد جيبي مسلطة على الخط . وحدا المعادلة [4.5] يمثلان على التوالي الموجة المنتقل الخلفية $V_{b1}e^{\gamma_{11}x}$ والموجة المنتقلة الامامية $V_{f1}e^{-\gamma_{11}x}$ (لاحظ ان الموجة المنتقلة الامامية تم اخذها على انها تنتقل في اتجاه تزايد x بينما في الفقرتين 1.3.2 و 1.3.6 من الجزء 1 تم تبني الاصطلاح المعكوس للسهولة) .

معادلة [4.5] يمكن اعادة كتابتها باستعمال الثابت الأختياري T_{11} (رغم أنها في هذه الحالة تساوي وحدة واحدة) وكما يلي

$$V_{10} = T_{11}(V_{f1}\,e^{-\gamma_{11}x}+V_{b1}\,e^{\gamma_{11}x}). \qquad [4.7]$$

ومن المعادلة [4.1] يمكننا أن نكتب

$$I_1 = Z_{11}{}^{-1}\gamma_{11}T_{11}(V_{f1}\,e^{-\gamma_{11}x}-V_{b1}\,e^{\gamma_{11}x}) \qquad [4.8]$$

وبما أن T_{11} هي 1 هنا و γ_{11} معرفة بالمعادلة [4.6] فان

$$I_1 = \frac{1}{Z_{c11}}(V_{f1}\,e^{-\gamma_{11}x}-V_{b1}\,e^{\gamma_{11}x}) \qquad [4.9]$$

حيث أن

$$Z_{c11} = \sqrt{\left(\frac{Z_{11}}{Y_{11}}\right)} \qquad [4.10]$$

$$\begin{aligned}\gamma_{11} &= [(R_1+j\omega L_1)(j\omega C_1)]^{\frac{1}{2}}\\ &= j\omega(L_1C_1)^{\frac{1}{2}}(1+R_1/j\omega L_1)^{\frac{1}{2}}\\ &\simeq j\omega(L_1C_1)^{\frac{1}{2}}(1+R_1/2j\omega L_1)\end{aligned}$$

ومن [4.6] تكون

$$\alpha_{11} \simeq \frac{R_1}{2}\sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \simeq \frac{R_1}{2Z_c}$$

و Z_{c11} هي الممانعة الذاتية المميزة (او المتمورة) للموصل 1 . اذا أمكننا اهمال المفاقيد فان Z_{c11} ستصبح $Z_c = \sqrt{(L/C)}$

اذا كانت R_1 و L_1 و C_1 هي المقاومة المتوالية والمحاثة والسعة الى الأرضي للخط لكل وحدة طول . وكانت المواصلة المتوازية صغيرة الى حد الاهمال فان

من ناحية ثانية فانه بسبب الفولتيات العالية على الخطوط خلال ظروف التمور والتي تسبب مفاقيد هالة مهمة جداً وتيارات قد تجري في مسارات الأرض . سيكون للتعبير الرياضي المعطى أعلاه لمعامل التوهين استعمال محدود جداً . وتتعرض خطوط النقل الى اضطرابات غير جيبية مثلما يحدث بسبب الصاعقة او بسبب الاقلدة (أنظر الفصول 5 و 2) وليس من الممكن الحصول على حل عام للمعادلة [4.3] لمثل هذه الاشكال الموجية الكيفية . ويمكن تمثيل شكل موجة فولتية الصاعقة تقريبياً لأغراض الفحوص القياسية بالفرق بين مركبتين اسيتين والذي يعطينا موجة من النوع المبين في شكل 4.2 . مثلاً الموجة المسلطة عادة في الفحص الدفعي للأجهزة هي موجة الـ 1 50 حيث ان $t_1 = 1$ مايكروثانية و $t_2 = 50$ مايكروثانيــة .

4.2.1 خط عديم الفقد LOSS-FREE LINE

عندما تنتقل فولتية تمور على طول خط ما فان الفولتية اللحظية v عند أي زمن t وموضع x في الخط يمكن ان تكتب بوصفها دالّة F للزمن t والموضع x ويرمز لها

$$v = \mathrm{F}(t+Ax) \qquad [4.11]$$

واذا عددنا الخط عديم الفقد للسهولة للغرض الحالي . ومن ثم التغيير من قيم ج . م . ت للتيارات والفولتيات الجيبية الى قيم لحظية . فان المعادلة [4.3] ستصبح

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = L_1 C_1 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \qquad [4.12]$$

حيث ان L_1 و C_1 هما المحاثة والسعة لكل متر . وبما ان سرعة الانتشار u للتمور على طول الخط تكون (أنظر الفقرة 1.3.6 من الجزء I) $u = \omega/\beta_{11}$ لكل مركبة تردد للتمور $\omega/2\pi$ ومعامل تغير الطور $\beta_{11} = \omega\sqrt{(L_1 C_1)}$ لخط عديم الفقد (أنظر الفقرة 1.3.8 من الجــزء I) فعندئــذٍ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \qquad [4.13]$$

ولفولتية التمور العامة للمعادلة [4.11] . ستعطينا المعادلة [4.13] مايــلي

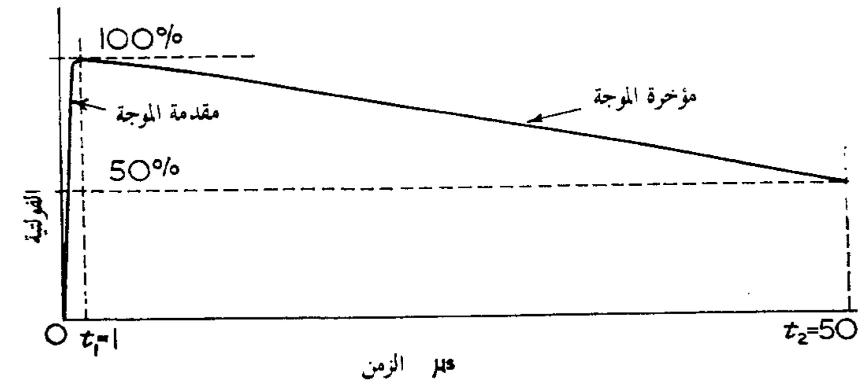
$$A^2 \mathrm{F}''(t+Ax) = \frac{1}{u^2}\mathrm{F}''(t+Ax)$$

بحيــث ان $A = \pm \frac{1}{u}$

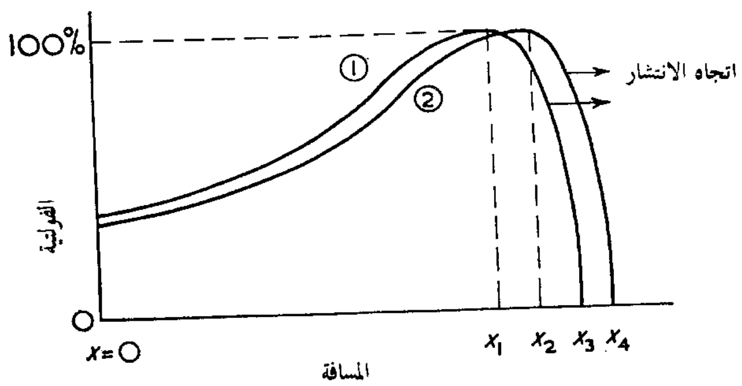
$$v = F\left(t \pm \frac{x}{u}\right) \text{or } v = F(x \pm ut)$$

هي حلول المعـــادلة [4.13] .

اذا تم تسليط الفولتية $v_f = f(x-ut)$ من النوع الموضح في شكل 4.2 على الخط لشكل 4.1 عند النقطة $x = 0$ وعند الزمن $t = 0$. وخلال زمن t_1 تحركت مسافة x_3 على طول الخط . عندئذ ستكون الفولتية عند المواضع المتوسطة بين $x = 0$ و $x = x_3$ كما مؤشرة في شكل 4.3 . وبما أننا تمعنا في خط عديم الفقد فقط عند هذه اللحظة فان الفولتية عند موضع متوسط معين x_1 ستكون %100 (أنظر شكل 4.3) .. وعند الزمـــن $t_2 > t_1$ عندما تكون مقدمة الموجة قد وصلت x_4 وذروة الفولتية



شكل 4.2 شكل موجة فولتية دفعية 1/50



شكل 4.3 توزيع الفولتية على طول خط بسبب موجة منتقلة امامية

1 عند اللحظة t_1

2 عند اللحظة t_2 حيث ان $t_2 > t_1$

ستحدث عند الموضـع x_2 . وهـذه المسافـة x_2 . يجب ان تعطـى بالمعادلـة $(x_1-ut_1)=(x_2-ut_2)$ والتي تبين أن $x_2>x_1$ وكما موضح في شكل 4.3 . لذلك فان هذه المركبة هي موجة منتقلة أمامية . وبالتشابه $v_b=\mathrm{b}(x+ut)$ وهي تمثل موجة منتقلة خلفية تتحرك باتجاه تناقص x الى الخلف نحو مصدر الاضطراب الأصلي والتي تسببت بوساطة انقطـاع (انظر الفقـرة 4.4) .

لخط عديم الفقد . تصبح المعادلة [4.2] لظروف لحظية كما يـلي

$$-\frac{\partial i}{\partial x}=C_1\frac{\partial v}{\partial t} \qquad [4.14]$$

ولموجة منتقلة أمامية $v_f=\mathrm{f}(x-ut)$ والتي ستسبب موجة منتقلة أمامية ذات تيار i_f

$$\frac{\partial i_f}{\partial x}=C_1uf'(x-ut)$$

وبذلـك فـأن

$$i_f=C_1u\mathrm{f}(x-ut)=C_1uv_f$$

وبمـا أن

$$u=\frac{1}{\sqrt{(L_1C_1)}}$$

$$i_f=v_f/Z_c \qquad [4.15]$$

حيـث أن $Z_c=\sqrt{(L_1/C_1)}$ هي الممانعة (الذاتية) المميزة (اوممانعة التمور) ، التي يستعمل لها الرمز Z_0 عادة ولكن تم تجنب هذا الرمز هنا لأحتمال اختلاطه مع ممانعة التتابع الصفري) . تعطى الممانعة المميزة بصورة عامة بالمعادلة [4.10] ولكن لخط عديم الفقد (او عديم التشوش) تكون Z_c مقاومة نقية . تطبيق [4.14] الى موجة فولتية منتقلة خلفية $v_b=\mathrm{b}(x+ut)$ مع موجة منتقلة خلفيه ناتجة ذات تيار i_b سيعطينا

$$\frac{\partial i_b}{\partial x}=-C_1u\mathrm{b}'(x+ut)$$

وبذلـك فـان

$$i_b=-C_1u\mathrm{b}(x+ut)=-C_1uv_b$$

$$i_b=-v_b/Z_c \qquad [4.16]$$

لذلك فأن الحل الكامل للمعادلة [4.13] هو فولتية لحظية v للموصل نسبة الى الأرض والتي يمكن ان تعطى بالمعادلة التاليـــة

$$v = v_f + v_b = f(x-ut) + b(x+ut) \qquad [4.17]$$

والتيار اللحظي i الجاري في الموصـــل يكـــون

$$i = i_f + i_b = \frac{1}{Z_c}(v_f - v_b) \qquad [4.18]$$

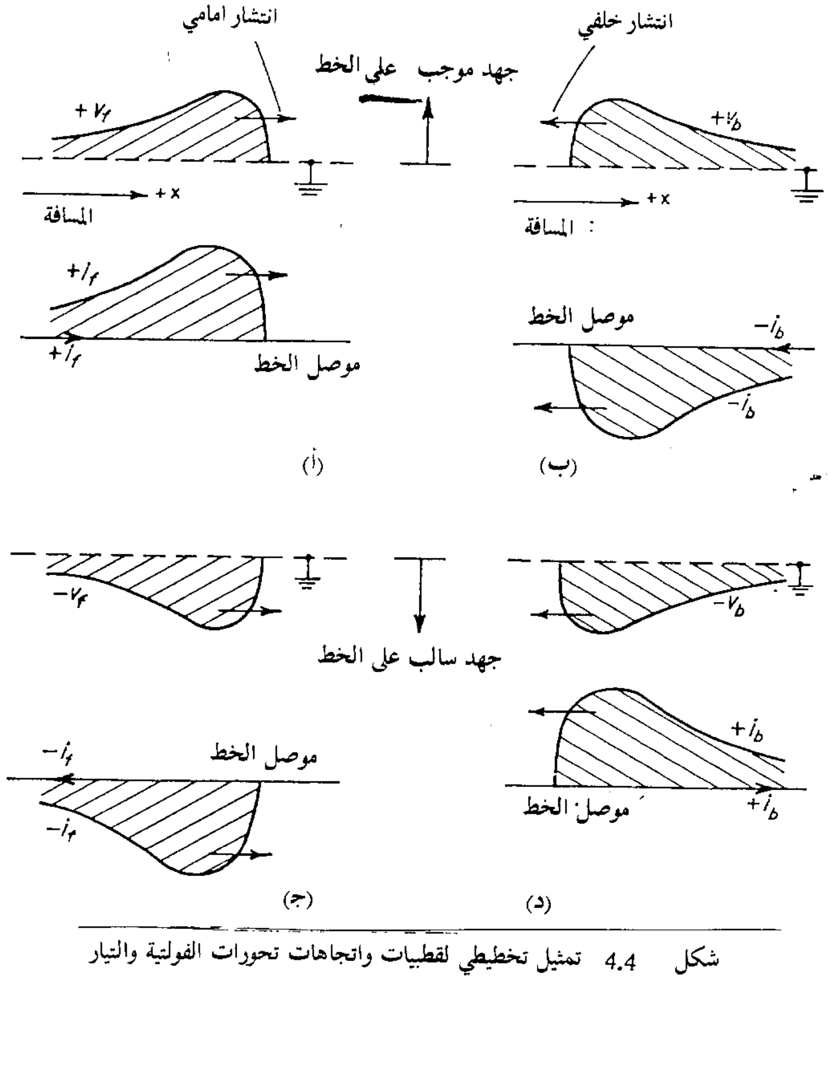
أهمية الاشارة السالبة في [4.16] ، وفي المعادلة [4.9] الأعم هي ان الموجه المنتقلة الخلفية للتيار تجري في اتجاه x السالب في موصل الخط عندما تكون فولتيتها المنتقلة الخلفية موجية (أي انه عندما تجعل v_b الموصل موجباً نسبة الى الارض). وبالعكس فان i_b سيجري في اتجاه x الموجب خلال الموصل اذا كانت v_b سالبة . وهكذا فاذا كانت الموجتان الامامية والخلفية كلتاهما موجية فان الموجة الخلفية للتيار تختلف عن الأمامية في نقطتين . أي في اتجاه سريانها في الموصل اضافة الى الاتجاه الذي تنتشر موجة التيار فيه على طول الخط . الموجات الأمامية والخلفية الموجية للفولتية والتي ترفع جهد موصل الخط الى مافوق الجهد الأرضي مبينة في شكل 4.4 (أ) و(ب) على التوالي مع موجات تياراتها المناظرة . وبالتشابه فان الشكلين 4.4 (ج) و(د) يبينان التيارات المكونة بوساطة أمواج الفولتية المنتقلة الأمامية والخلفية والتي هي سالبة بحيث ان جهد الخط سيقل الى تحت جهد الأرضي .

الممانعة (الذاتية) المميزة $Z_c = \sqrt{(L/C)}$ لخط نقل عديم الفقد هي تقريب مقاومي الى مشغل الممانعة –الذاتية للتمور والمعطاة بالمعادلة [4.10] والتي هي دالة للتردد

$$\sqrt{\frac{\mathbf{Z}_{11}}{\mathbf{Y}_{11}}} = \sqrt{\left(\frac{R_1+L_1\mathrm{s}}{G_1+C_1\mathrm{s}}\right)} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}\sqrt{\left(\frac{\mathrm{s}+\alpha_{11}+\beta_{11}}{\mathrm{s}+\alpha_{11}-\beta_{11}}\right)} = \mathbf{Z}_{c11}(\mathrm{s})$$

حيث ان s هو المتغير المركب $\sigma + j\omega$. لخط ذي مفاقيد قدره جزئية سوف لاتكون أشكال موجات الفولتية والتيار هي نفسها بالضبط . علاوة على ذلك سوف لاتمثل الدائرة المكافئة لشكل 4.1 سوى الظروف في كل طور من خط ثلاثي الطور اذا كانت

الدائرة متوازنة تماماً (أنظر الفقرة 7.3.1) . من ناحية ثانية فان المحاثة والسعة لخط ثلاثي الطور سوف لاتكون متوازنة تماماً لأن المباعدة بين موصلات الخط غير متماثلة (أنظر الفصلين 2 و 3 من الجزء الأول) وبذلك فانه بدلاً من ممانعة مميزة مقاومية مفردة Z_c ستكون هناك بالتحديد مجموعة من الممانعات المركبة الذاتية والتبادلية لكل من الترددات المركبة والتي ستشكل اضطراباً معيناً على الخط – ولأغراض متعددة يكفي أن ناخذ بالتقريب البسيط لمعدل الممانعة الذاتية المميزة المقاومية Z_c التي تم تطبيقها في الفقرة 4.4 . من ناحية ثانية فقد نشأت بعض المشاكل في السنين الأخيرة بحيث ان هذا التقريب سوف لايكون مرضيا ، مثلا في حماية وسائل الاتصال الحاملة في خط قدرة للخطوط الطويلة (أنظر الفقرة 1.3) ، وفي موقع العطل (أنظر الفقرة 4.4.2) ، وفي عملية الأقلدة لعزل الخطوط غير المحملة ، (أنظر الفقرتين 2.10 و



شكل 4.4 تمثيل تخطيطي لقطبيات واتجاهات تحورات الفولتية والتيار

2.11) . وفي فولتيات الاسترداد لقواطع الدورة تحت ظروف عطل خط قصير (أنظر الفقرة 2.13) . لقد بين Wedepohl أنه لمثل هذه الاغراض يمكن استعمال طرق المصفوفات لصياغة معادلات يمكن أن تحل فيما بعد بوساطة الحاسبة . وستعطى مقدمة عن عمل Wedepohl في تطبيقات طرق المصفوفات في الفقرة 4.3 للحالة البسيطة لموصلين مع مستوٍ أرضي قريب بعد التعريف بالمشكلة في الفقرة القادمة اولاً .

4.2.2 موصلان مع مستوٍ ارضي قريب

TWO CONDUCTORS WITH NEARBY EARTH PLANE.

بدلاً من الموصل المفرد لشكل 4.1 سيكون هنا موصلان 1 و 2 مع ممانعة ذاتية Z_{11} و Z_{22} على التوالي لكل وحدة طول وممانعة تبادلية بينهما مقدارها Z_{12} لكل وحدة طول . حيث ان $Z_{12} = Z_{21}$ لمنظومة ثنائية الاتجاه وسيكون ذلك بسبب المحاثة التبادلية بصورة رئيسية . رغم أنه قد تنشأ مقاومات انتقال القدرة والتي تمثل انتقال القدرة بين طور وآخر . بسبب المباعدة غير المتماثلة (أنظر الفقرة 2.9 من الجزء 1) . وبسبب هذه المعالم المتوالية لجزء صغير من الخط تكون المعادلتان المناظرتان للمعادلـــة [*4.1*] كما يـــلي

$$\frac{dV_1}{dx} = -Z_{11}I_1 - Z_{12}I_2 \qquad [4.19]$$

$$\frac{dV_2}{dx} = -Z_{12}I_1 - Z_{22}I_2 \qquad [4.20]$$

حيث أن V_1 و V_2 قد كتبتا بدلاً من V_{10} و V_{20} بوصفهما فولتيات ج.م.ت لتردد معين بين الخط ذي العلاقة والارض .

وبالتشابه فهناك مساحات متوازية لكل وحدة طول بين كل خط والأرض وبين الخطين . الأخير يرمز له Y_{12} ولكن لو كانت العلامات للسابق هي Y_{11} و Y_{22} فان المعادلة المناظرة للمعادلة [*4.2*] ستظهر على انها $dI_1/dx = -Y_{11}V_1 - Y_{12}V_{12}$

$$= -(Y_{11}+Y_{12})V_1 + Y_{12}V_2$$

ولكي يمكننا اعطاء معادلات مناظرة لتلك التي في [4.19] و[4.20] فمن المناسب تعريف المساحة المتوازية لخط 1 الى الارض على انها ($Y_{11}-Y_{12}$) بدلاً من Y_{11} وتلك التي بين الخط 2 والأرض على أنها ($Y_{22}-Y_{12}$) بدلاً من Y_{22} . المعادلات المناظرة للمعادلة [4.2] يمكن أن تكتب بعد ذلك .

$$\frac{dI_1}{dx} = -Y_{11}V_1+Y_{12}V_2 \qquad [4.21]$$

$$\frac{dI_2}{dx} = Y_{12}V_1-Y_{22}V_2 \qquad [4.22]$$

بتفاضل وتعويض المعادلات الاربع هذه نحصل على

$$\frac{d^2V_1}{dx^2} = P_{11}V_1+P_{12}V_2 \qquad [4.23]$$

$$\frac{d^2V_2}{dx^2} = P_{21}V_1+P_{22}V_2 \qquad [4.24]$$

$$\frac{d^2I_1}{dx^2} = P_{11}I_1+P_{21}I_2 \qquad [4.25]$$

$$\frac{d^2I_2}{dx^2} = P_{12}I_1+P_{22}I_2 \qquad [4.26]$$

حيث ان

$$P_{11} = (Z_{11}Y_{11}-Z_{12}Y_{12}) \qquad [4.27]$$

$$P_{12} = -(Z_{11}Y_{12}-Z_{12}Y_{22}) \qquad [4.28]$$

$$P_{21} = (Z_{12}Y_{11}-Z_{22}Y_{12}) \qquad [4.29]$$

$$P_{22} = -(Z_{12}Y_{12}-Z_{22}Y_{22}) \qquad [4.30]$$

وبكتابة [4.23] الى [4.26] بالنمط التشغيلي فان هذه المعادلات يمكن ان تحل ولكن يمكن الحصول على الحلول بصورة أكثر ملائمة باستعمال جبر المصفوفات وكما سيبين في الفقرة 4.3 . لأن الأخيرة يمكن توسيعها بسهولة لكي تتعامل مع حسابات الحاسبة الرقمية التي تشتمل على اعداد أكبر لموصلات غير متماثلة المباعدة . كما يحدث مع الموصلات الحزمية وخطوط النقل الثلاثية الطور الثنائية الدائرة .

4.3 طرق المصفوفات مطبقة على موصلين مع مستوى ارضي قريب

Matrix methods applied to two conductors with nearby earth plane

المعادلات [4.19] الى [4.26] يمكن ان تكتب بصيغة مصفوفة وكما يلي

$$\left[\frac{dV}{dx}\right] = -[Z][I] \qquad [4.31]$$

$$\left[\frac{dI}{dx}\right] = -[Y][V] \qquad [4.32]$$

$$\left[\frac{d^2V}{dx^2}\right] = [Z][Y][V] = [P][V] \qquad [4.33]$$

$$\left[\frac{d^2I}{dx^2}\right] = [Y][Z][I] = [P]_t[I] \qquad [4.34]$$

اذا استعملنا مصفوفة فولتية مركَّبة $[V_c]$ بحيث أن

$$[V] = [T][V_c] \qquad [4.35]$$

فان [T] ستكون مصفوفة التحويل الخطية (مشابهة لمصفوفة تحويل المركبات المتماثلة [T_s] – أنظر الفقرة 7.6) والتي ستكون لها اربعة عناصر لحالة موصلين . وسيكون لها عنصر واحد فقط لحالة موصل مفرد والتي كانت وحدة واحدة . وبذلك فلموصل واحد $V_{c1} = V_{10}$ وتعطى بالمعادلة التاليـة

$$V_{c1} = V_{f1}\, e^{-\gamma_{11}x} + V_{b1}\, e^{\gamma_{11}x} \qquad [4.36]$$

وفي حالة الموصلين الحالية ستكون [V_c] : (مثل [V]) متجها عموديا له مركبتان V_{c1} و V_{c2} . ومن [4.33] و[4.35] يمكننا ان نجد المعادلة التالية

$$\left[\frac{d^2V_c}{dt^2}\right] = [T]^{-1}[P][T][V_c] = [\gamma^2][V_c] \qquad [4.37]$$

اذا كانت

$$[\gamma^2] = [T]^{-1}[P][T]$$

يمكننا ان نختار مصفوفة التحويل [T] بحيث انها تجعل [γ^2] مصفوفة قطرية وفي هذه الحالة

$$\frac{d^2}{dx^2}\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{c1} \\ \mathbf{V}_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{c1} \\ \mathbf{V}_{c2} \end{bmatrix} \qquad [4.38]$$

وبذلك فان

$$\frac{d^2\mathbf{V}_{c1}}{dx^2} = \gamma_1^2\mathbf{V}_{c1} \qquad [4.39]$$

$$\frac{d^2\mathbf{V}_{c2}}{dx^2} = \gamma_2^2\mathbf{V}_{c2} \qquad [4.40]$$

المعادلتان [4.39] و[4.40] تشبهان بالضبط المعادلة [4.3] ولذلك فان

$$\mathbf{V}_{c1} = \mathbf{V}_{f1}\, e^{-\gamma_1 x} + \mathbf{V}_{b1}\, e^{\gamma_1 x} \qquad [4.41]$$

$$\mathbf{V}_{c2} = \mathbf{V}_{f2}\, e^{-\gamma_2 x} + \mathbf{V}_{b2}\, e^{\gamma_2 x} \qquad [4.42]$$

واللتان تكونان مشابهتين للمعادلة [4.36] التي تطبق على حالة الموصل المفرد. بما أن $[\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{P}][\mathbf{T}] = [\gamma^2]$ فأن ضرباً سابقاً لكلا الطرفين بالمصفوفة [T] سيعطينا

$$[\mathbf{P}][\mathbf{T}] = [\mathbf{T}][\gamma^2] \qquad [4.43]$$

وبفك المعادلة [4.43] نحصل على

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{T}_{21} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{T}_{21} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \gamma_1^2 & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{P}_{11}\mathbf{T}_{11}+\mathbf{P}_{12}\mathbf{T}_{21}) & (\mathbf{P}_{11}\mathbf{T}_{12}+\mathbf{P}_{12}\mathbf{T}_{22}) \\ (\mathbf{P}_{21}\mathbf{T}_{11}+\mathbf{P}_{22}\mathbf{T}_{21}) & (\mathbf{P}_{21}\mathbf{T}_{12}+\mathbf{P}_{22}\mathbf{T}_{22}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11}\gamma_1^2 & \mathbf{T}_{12}\gamma_2^2 \\ \mathbf{T}_{21}\gamma_1^2 & \mathbf{T}_{22}\gamma_2^2 \end{bmatrix}$$

وبمساواة العناصر المتناظرة نحصل على

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{P}_{11}\mathbf{T}_{11}+\mathbf{P}_{12}\mathbf{T}_{21} &= \mathbf{T}_{11}\gamma_1^2 \\ \mathbf{P}_{21}\mathbf{T}_{11}+\mathbf{P}_{22}\mathbf{T}_{21} &= \mathbf{T}_{21}\gamma_1^2 \end{aligned}\right\} \qquad [4.44]$$

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{P}_{11}\mathbf{T}_{12}+\mathbf{P}_{12}\mathbf{T}_{22} &= \mathbf{T}_{12}\gamma_2^2 \\ \mathbf{P}_{21}\mathbf{T}_{12}+\mathbf{P}_{22}\mathbf{T}_{22} &= \mathbf{T}_{22}\gamma_2^2 \end{aligned}\right\} \qquad [4.45]$$

كلا المعادلتين [4.44] و[4.45] ستكون محتواة ضمن

$$\left.\begin{aligned} P_{11}T_{11}+P_{12}T_{21} &= T_{11}\gamma^2 \\ P_{21}T_{11}+P_{22}T_{21} &= T_{21}\gamma^2 \end{aligned}\right\} \qquad [4.46]$$

المعادلة [4.46] تناظر المعادلتين [A.1.24] و[A.1.25] في الملحق 1 الا انها ذات رتبة واحدة أقل. والكميات المناظرة هي [T] و[X]، [P] و[A]، و γ^2 و λ. (كون λ كمية لاموجهة قد تكون رقماً حقيقياً أو مركباً فيمكن على التساوي ان تضرب ضرباً سابقاً أوضرباً لاحقاً بالمصفوفة [X] في [A.1.25]).

وبذلك فأن قيمتي γ^2 اللتين نحتاجهما. أي γ_1^2 و γ_2^2 هما قيم eigen للمصفوفة [P] وكما مبين في الملحق A.1.10 . وبتطبيق [A. 1.28] نحصل على

$$\left|P-\gamma^2\right| = 0 \qquad [4.47]$$

لذلك فمن المعادلة [4.46] يمكننا ان نكتب

$$\begin{vmatrix} (P_{11}-\gamma^2) & P_{12} \\ P_{21} & (P_{22}-\gamma^2) \end{vmatrix} = 0$$

$$(P_{11}-\gamma^2)(P_{22}-\gamma^2)-P_{12}P_{21} = 0$$

هذه المعادلة تربيعية في γ^2 وتعطينا

$$\left.\begin{aligned} \gamma_1^2 &= \tfrac{1}{2}(P_{11}+P_{22}+\{(P_{11}-P_{22})^2+4P_{12}P_{21}\}^{\frac{1}{2}}) \\ \gamma_2^2 &= \tfrac{1}{2}(P_{11}+P_{22}-\{(P_{11}-P_{22})^2+4P_{12}P_{21}\}^{\frac{1}{2}}) \end{aligned}\right\} \qquad [4.48]$$

وبذلك فان [4.48] تمكننا من حساب قيمتي معاملي الأنتشار الظاهرين في [4.41]

و[4.42] من ممانعات ومسامحات المنظومة باستعمال [4,27] الى [4.30]. والمرحلة التالية هي حساب عناصر مصفوفة التحويل [T]. المعادلتان [4.44] و [4.45] يمكن ان تكتبا بصيغة مصفوفة وكما يلي

$$[P-\gamma_i^2][T_i] = 0 \qquad [4.49]$$

حيث ان [T_i] هي متجه عمودي عناصره هي عناصر العمود i نفسها في [T] . بين ان T_{11} و T_{21} هي ذواتا اعتماد تبادلي وان T_{12} و T_{22} هي ذواتا اعتماد تبادلي . من الضروري تعيين قيمة واحدة من كل من ازواج العناصر هذه أي أنه اذا تم تعيين قيمة T_{11} و T_{22} فمن المعادلة [4.44] يمكننا ان نحصل على

$$\mathbf{T}_{21} = (\gamma_1^2 - \mathbf{P}_{11}) \frac{\mathbf{T}_{11}}{\mathbf{P}_{12}} \qquad [4.50]$$

ومن [4.45] يمكننا ان نحصل

$$\mathbf{T}_{12} = (\gamma_2^2 - \mathbf{P}_{22}) \frac{\mathbf{T}_{22}}{\mathbf{P}_{21}} \qquad [4.51]$$

قيم γ_1^2 و γ_2^2 المعطاة في [4.48] يمكن ان تعوض الآن في [4.50] و[4.51] وهذه بدورها يمكن ان تعوض في [4.35] باستعمال الفولتيات المركبة في [4.41] و[4.42] لحساب الفولتيات الى الأرض للخطين والتي ستعطى بالمعادلتين التاليتين

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{T}_{11}(\mathbf{V}_{f1}\, e^{-\gamma_1 x} + \mathbf{V}_{b1}\, e^{\gamma_1 x}) + \mathbf{T}_{12}(\mathbf{V}_{f2}\, e^{-\gamma_2 x} + \mathbf{V}_{b2}\, e^{\gamma_2 x}) \qquad [4.52]$$

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{T}_{21}(\mathbf{V}_{f1}\, e^{-\gamma_1 x} + \mathbf{V}_{b1}\, e^{\gamma_1 x}) + \mathbf{T}_{22}(\mathbf{V}_{f2}\, e^{-\gamma_2 x} + \mathbf{V}_{b2}\, e^{\gamma_2 x}) \qquad [4.53]$$

الثوابت الكيفية V_{f1} وV_{b1} وV_{f2} و V_{b2} تعتمد على أشكال موجات الأضطرابات في أي حالة معينة ولايوجد هناك حل عام لمعادلة الموجة لأشكال الموجات الكيفية وكل من المعادلات المعطاة هنا لاتطبق الا على مركبات تردد مفرد واحد .
تيارات الخط يمكن تحديدها باعادة كتابة [4.31] وكما يلي

$$[\mathbf{I}] = -[\mathbf{Z}]^{-1} \left[\frac{d\mathbf{V}}{dx} \right] \qquad [4.54]$$

وبتعويض قيم $\frac{dV_1}{dx}$ و $\frac{dV_2}{dx}$ التي حصلنا عليها من [4.52] و[4.53] في [4.54] نحصل على

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{|Z|}\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{22} & -\mathbf{Z}_{12} \\ -\mathbf{Z}_{12} & \mathbf{Z}_{11} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11}\gamma_1(-\mathbf{V}_{f1}\,e^{-\gamma_1 x}+\mathbf{V}_{b1}\,e^{\gamma_1 x})+\mathbf{T}_{12}\gamma_2(-\mathbf{V}_{f2}\,e^{-\gamma_2 x} + \mathbf{V}_{b2}\,e^{\gamma_2 x}) \\ \mathbf{T}_{21}\gamma_1(-\mathbf{V}_{f1}\,e^{-\gamma_1 x}+\mathbf{V}_{b1}\,e^{\gamma_1 x})+\mathbf{T}_{22}\gamma_2(-\mathbf{V}_{f2}\,e^{-\gamma_2 x} + \mathbf{V}_{b2}\,e^{\gamma_2 x}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_1 = \frac{1}{|Z|}\{\gamma_1(\mathbf{Z}_{22}\mathbf{T}_{11}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{21})(\mathbf{V}_{f1}\,e^{-\gamma_1 x}-\mathbf{V}_{b1}\,e^{\gamma_1 x}) + \gamma_2(\mathbf{Z}_{22}\mathbf{T}_{12}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{22})(\mathbf{V}_{f2}\,e^{-\gamma_2 x}-\mathbf{V}_{b2}\,e^{\gamma_2 x})\} \quad [4.55]$$

$$\mathbf{I}_2 = \frac{1}{|Z|}\{\gamma_1(\mathbf{Z}_{11}\mathbf{T}_{21}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{11})(\mathbf{V}_{f1}\,e^{-\gamma_1 x}-\mathbf{V}_{b1}\,e^{\gamma_1 x}) + \gamma_2(\mathbf{Z}_{11}\mathbf{T}_{22}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{12})(\mathbf{V}_{f2}\,e^{-\gamma_2 x}-\mathbf{V}_{b2}\,e^{\gamma_2 x})\} \quad [4.56]$$

حيث ان

$$|Z| = \mathbf{Z}_{11}\mathbf{Z}_{22}-\mathbf{Z}_{12}^2$$

المعادلتان [4.52] و [4.53] تبينان ان الفولتية الى الأرض لكل من موصلي الخط تحتوي على موجة منتقلة أمامية واحدة وموجة منتقلة خلفية واحدة كلاهما مع ثابت الأنتشار γ_1 . مع زوج ثان من الموجات المتنقلة الأمامية والخلفية مع ثابت انتشار γ_2 . وبالتشابه فان المعادلتين [4.55] و [4.56] تبينان ان كل تيار خط يحتوي على زوج من الموجات الأمامية والخلفية مصاحبة لثابت الأنتشار γ_1 وزوج ثانٍ مع γ_2 .

الممانعة $\mathbf{Z}_{1\gamma 1}$ التي تصل مركبات الفولتية والتيار للموصل 1 وللثابت γ_1 يمكن ان تعطى أمواجها الأمامية والخلفية (من [4.52] و [4.55]) بالمعادلة التالية

$$\mathbf{Z}_{1\gamma 1} = \frac{\mathbf{T}_{11}|Z|}{\gamma_1(\mathbf{Z}_{22}\mathbf{T}_{11}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{21})} = \frac{|Z|}{\gamma_1(\mathbf{Z}_{22}-\mathbf{Z}_{12}\mathbf{T}_{21}/\mathbf{T}_{11})} \quad [4.57]$$

هناك ثلاث ممانعات أخرى تصل مركبات التيار والفولتية لموصل واحد بالنسبة لحالة موصلين . أي انه للموصل 1 وأمواج γ_2

وللموصل 2 وأمواج γ_1

$$Z_{1\gamma 2} = \frac{T_{12}|Z|}{\gamma_2(Z_{22}T_{12}-Z_{12}T_{22})} = \frac{|Z|}{\gamma_2(Z_{22}-Z_{12}T_{22}/T_{12})}$$

[4.58]

$$Z_{2\gamma 1} = \frac{T_{21}|Z|}{\gamma_1(Z_{11}T_{21}-Z_{12}T_{11})} = \frac{|Z|}{\gamma_2(Z_{11}-Z_{12}T_{11}/T_{21})}$$

[4.59]

وللموصل 2 وأمواج γ_2

$$Z_{2\gamma 2} = \frac{T_{22}|Z|}{\gamma_2(Z_{11}T_{22}-Z_{12}T_{12})} = \frac{|Z|}{\gamma_2(Z_{11}-Z_{12}T_{12}/T_{22})}$$

[4.60]

كل من الممانعات الأربع أعلاه تكون ثابتة لمركبة تردد معينة للأضطراب لأن [4.48] و[4.27] الى [4.30] تبين أنها لاتعتمد الا على ممانعات ومسامحات المنظومة. رغم ان هذه الممانعات تشبه ممانعات التمورفان التعريف المعتاد للأخيرة هي أنها تلك المجموعة من ممانعات الأطراف التي تعطي عامل انعكاس مقداره صفر (انظر الفقرة التالية). ويمكن ان يبين ان مصفوفة ممانعات التمور الذاتية والتبادلية لمنظومة متعددة الموصلات ستكون $[T][\gamma]^{-1}[T]^{-1}[Z]$. ومن جهة أخرى. ليس في نطاق هذا الكتاب التعمق بصورة أبعد في هذا الموضوع ولتطبيقات أبعد لطرق المصفوفات الى خطوط ثلاثية الطور يمكن الرجوع الى البحث الأصلي المنشور من قبل Wedepohl سنة (1963) والى مايتبعه من بحوث منشورة بهذا الصدد.

4.4 تاثيرات نقاط الانهاء المختلفة Effects of various terminations

في هذه الفقرة التي سيؤخذ فيها بنظر الأعتبار الأنعكاسات الحاصلة عند نقاط انهاء مختلفة من الضروري وضع بعض الأفتراضات التبسيطية وكما يلي :

(أ) الخط هو خط ثلاثي الطور ذو دائرة مفردة مع موصل واحد لكل طور.

(ب) لاتوجد مفاقيد في الخط.

(ج) الخط متوازن بصورة تامة.

لذلك من الممكن استعمال ممانعة تمور (ذاتية) مفردة $Z_c = \sqrt{(L_1/C_1)}$ وتكون مقاومية بحتة (نقية) . ونحتاج الى أن نتبصر في مجموعة واحدة من الأمواج المنتقلة الأمامية والخلفية في موصل خط واحد فقط (والتي سوف لايكون لها الا معامل انتشار مفرد لكل تردد مركبة فقط) . ولتبسيط أكثر. سنتمعن في فولتية دالة وحدة . حيث ستكون الفولتية المسلطة عند $x = 0$ تساوي صفراً الى أن تكون $t = 0$ عندها سترتفع الفولتية الى V وتبقى ثابتة خلال الفترة المعنية التي قد تكون عدة فترات عبور لخط معين . زمن العبور $\tau = l/u$ (حيث ان l تساوي طول الخط) ويكون بحدود 3.3 مايكروثانية / كم . الفولتيات الدفعية المسلطة خلال فحص المعدات في بريطانيا لها زمن . أمامي مقداره 1 مايكروثانية (t_1 في شكل 4.3) و 50 مايكروثانية لنصف قيمة الذروة فولتيات الصواعق قد يكون لها زمن أمامي بين 1 و 5 مايكروثانية ويمكن ان تهبط الى مايقرب من الصفر في بعض العشرات من المايكروثوان . وبعض تمورات الأقلدة لها ازمان أمامية تقارب مائة مايكروثانية أو أكثر. وبسبب المقاومـــة المتوالية للخط والهالة (انظر الفقرة 3.8 من الجزء 1) ومقاومة مسارات الأرضي والمواصلة المتوازية للخط فان التمورات ستواجه في الحقيقة توهيناً محسوساً . لهذه الأسباب فان افتراض فولتية دالة وحدة يكون بعيداً عن الحقيقة ولكن بما أنه لايوجد حل عام لمعادلة الموجة لشكل الموجه الكيفي فاننا نحتاج لبعض الأفتراضات لشكل الموجه للأغراض الحالية والموجه المستطيلة تتيح لنا فحصاً بسيطاً لنقاط انهاء مختلفة . وهذه الحالة الخاصة لزمن مقدمة موجه مقداره صفر والفولتية الباقية عند قيمة الذروة بدلاً من ان يكون لها ذنب هابط . لها محاسن اضافية في كونها تشاؤمية في اجهادها للعازل عند المقدمة والذنب كليهما .

4.4.1 نقطة انهاء عامة GENERAL TERMINATION

اذا كان الخط ذا طول لانهائي فان نسبة الفولتية الى التيار عند أية نقطة فيه ستكون مساوية للمانعة المميزة (كما بينا في الفقرة 1.3.5 من الجزء 1) وسيسبب حدوث اضطراب عند طرف واحد موجة منتقلة أمامية للفولتية وموجة منتقلة أمامية للتيار ومن الممكن ان لاتكون هناك أية انعكاسات . تبصر الآن في خط محدود ذي طول l . عند نقطة $x = 0$ و $t = 0$ تم تسليط فولتية اضطراب $V(t)$ وكانت هناك ممانعة متوالية $Z_1(s)$ تربط مصدر الأضطراب الى الخط . عند النقطة $x = l$ ستكون هناك ممانعة متوازية $Z_2(s)$ مربوطة بين موصل الخط والأرض .

الممانعات المتوالية والمتوازية $Z_1(s)$ و $Z_2(s)$ وعامل الممانعة المميزة $Z_{c11}(s)$ (انظر الفقرة 4.2.1) . والتي هي دوال للترد د بالتحديد بحيث أنها لاتكون متطابقة تماماً لكل مركبة من التمور. ويمكن الأفتراض انها جميعاً خطية وبناءً على ذلك يمكن ابدالها بالممانعات Z_1 و Z_2 و Z_c . ان جميع الفولتيات والتيارات هي دوال للزمن ولكنها تكتب V بدلاً من $V(t)$ ... الخ للسهولة .

عند $t = 0$ و $x = 0$ ستتولد موجة منتقلة أمامية $v_{f1} = V - i_1 Z_1$ على طول الخط . والموجة المنتقلة الأمامية الواصلة الى ممانعة الأنهاء Z_2 عند $x = l$ ستكون $v_{f1}\,e^{-\gamma l}$. هذا الأنهاء سيسبب موجة منتقلة خلفية v_{b1} يجب ان تنعكس بحيث ان الفولتية الكلية للخط نسبة الى الارض عند $x = l$ ستساوي v_l حيث ان :

$$v_l = v_{f1}\,e^{-\gamma l} + v_{b1} \qquad [4.61]$$

و

$$v_l - i_l Z_2 = 0 \qquad [4.62]$$

حيث ان تيار الخط عند $x = l$ تم اعطاؤه بالمعادلة [4.9] وكما يلي

$$i_l = 1/Z_c(v_{f1}\,e^{-\gamma l} - v_{b1}) \qquad [4.63]$$

وبالتعويض من [4.61] و [4.63] الى [4.62] نحصل على

$$v_{b1}\left(1 + \frac{Z_2}{Z_c}\right) = v_{f1}\,e^{-\gamma l}\left(\frac{Z_2}{Z_c} - 1\right)$$

$$v_{b1} = \left(\frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c}\right) v_{f1}\,e^{-\gamma l} \qquad [4.64]$$

المعادلة [4.64] تبين ان الموجة الخلفية المنعكسة من ممانعة الأنهاء Z_2 ستكون K_r مضروبة بالموجة الامامية (الساقطة) الواصلة الى نقطة الأنهاء حيث ان عامل انعكاس الأنهاء K_r سيكون

$$K_r = \left(\frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c}\right) \qquad [4.65]$$

المعادلة [4.65] تبين التأثيرات المعروفة لمضاعفة الفولتية عند الطرف مفتوح الدائرة للخط حيث ان $\mathbf{Z}_2 = \infty$ و $K_r = 1$ كما يجب ان تحدث فولتية مساوية الى صفر عند قطر الدائرة حيث تكون $\mathbf{Z}_2 = 0$ والفولتية المنعكسة ستكون مساوية ومضادة للفولتية الساقطة .

هذا الأنعكاس الأول سيحدث عند $t = \tau$ حيث سيكون زمن عبور الخط $\tau = l/u$. وعند $t = \tau$ ستتولد الموجة المنتقلة الخلفية باتجاه النقطة $x = 0$ حيث حدث الأضطراب الاصلي وعند $t = 2\tau$ ستصل هذه الى النقطة التي يكون فيها الخط مغلقاً بالممانعة $\mathbf{Z}_1$ المربوطة بين الخط والأرض. عندما تصل الموجة الخلفية ذات القيمة v_{b1} الى $\mathbf{Z}_1$ فانها ستكون قد واجهت توهيناً وتغيراً في الطوركلما أنتقلت مسافة مقدارها l بحيث انها ستكون الآن $v_{b1}\,\mathrm{e}^{\gamma(-l)} = v_{b1}\,\mathrm{e}^{-\gamma l}$. هذه الموجة الساقطة التي ستكون موجة منتقلة خلفية ستسبب انعكاساً هوموجة منتقلة أمامية ثانية v_{f2} تبتدأ من $x = 0$ باتجاه $x = l$ اذا كانت الفولتية بين الخط والارض هي v فانه عند الزمن $t = 2\tau$ سيكون للفولتية v ثلاث مركبات هي :

(أ) الموجة الأمامية الأصلية v_{f1}

(ب) الموجة الخلفية الأولى $v_{b1}\,\mathrm{e}^{-\gamma l}$

(جـ) الموجة الأمامية الثانية v_{f2}

وفولتية المصدر V هي مجموع هذه الفولتيات على الخط وهبوط الفولتية في الممانعة $\mathbf{Z}_1$

$$V = v_{f1} + v_{f2} + v_{b1}\,\mathrm{e}^{-\gamma l} + i_2\mathbf{Z}_1 \qquad [4.66]$$

و $v_{f1} = V - i_1\mathbf{Z}_1$ حيث ان $i_1 = V_{f1}/Z_c$ وهو تيار الخط الأصلي الذي كان يتألف كلياً من الموجة المنتقلة الأمامية للتيار التارك للنقطة $x = 0$ عند الزمن $t = 0$ وبتعويض هذه القيم للفولتية v_{f1} والتيار i_1 في [4.66] نحصل على

$$-v_{f1}\frac{\mathbf{Z}_1}{Z_c} + v_{f2} + v_{b1}\,\mathrm{e}^{-\gamma l} + i_2\mathbf{Z}_1 = 0 \qquad [4.67]$$

وتيار الخط i_2 عند $x = 0$ و $t = 2\tau$ سيكون كما معطى بالمعادلة التالية

$$i_2 = 1/Z_c(v_{f1} + v_{f2} - v_{b1}\,\mathrm{e}^{-\gamma l}) \qquad [4.68]$$

وبتعويض [4.68] في [4.67] نحصل على

$$v_{f2} = \left(\frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}\right) v_{b1}\, e^{-\gamma l} \qquad [4.69]$$

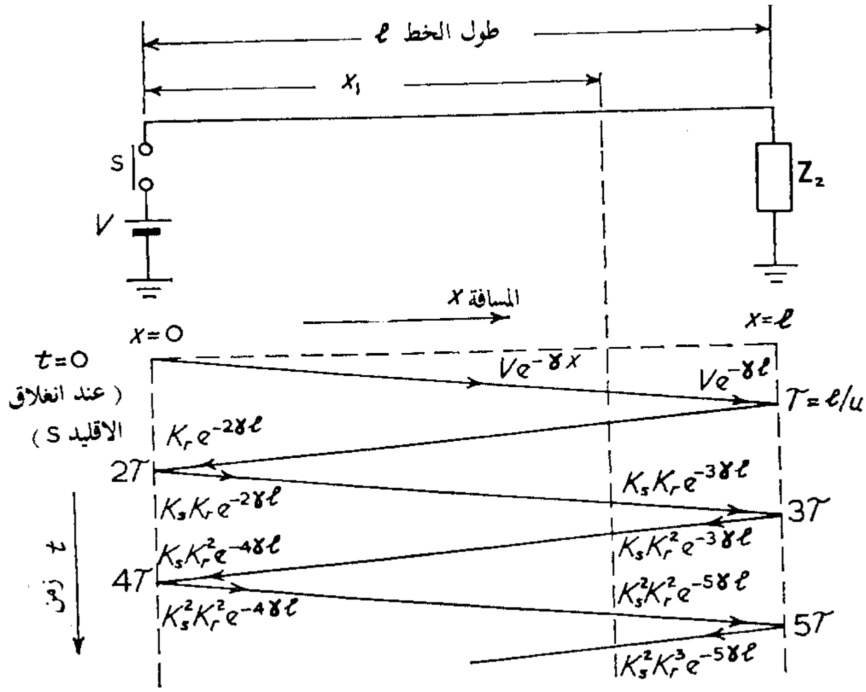
المعادلة [4.69] هي مشابهة بالضبط للمعادلة [4.64] حيث أنه في هذه الحالة تكون الموجة الأمامية المنعكسة من ممانعة المصدر Z_1 مساوية لـ K_s مضروباً بالموجة الخلفية (الساقطة) حيث ان

معامل انعكاس المصدر k_s هو

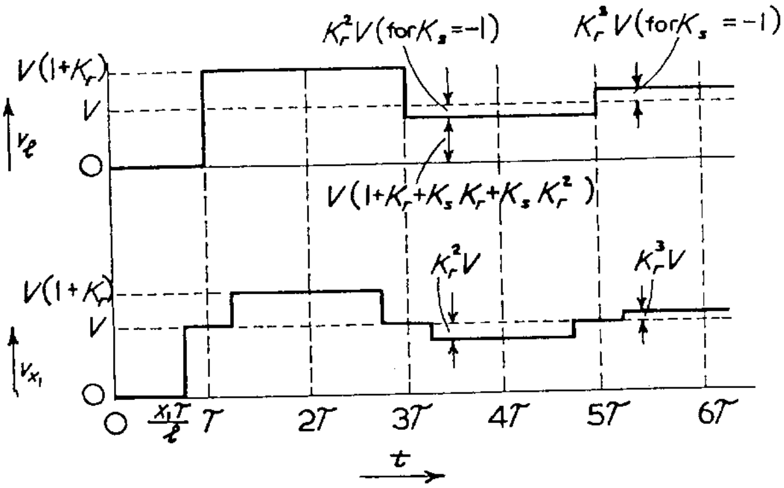
$$K_s = \left(\frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c}\right) \qquad [4.70]$$

الفولتيات عند أية نقطة على الخط وفي أية لحظة من الزمن يمكن ان تعرض بوساطة مخطط (Bewley) المشبك الذي يمكننا من ان نتبصر في أي عدد من الأنعكاسات المتتابعة .

لتبسيط التحليلات اعلاه يمكننا أخذ اضطراب الفولتية المسلط عند $t = 0$ بوصفها فولتية دالة ذات المقدار V مع $Z_1 = 0$ (وبذلك فان $K_s = -1$) فعندئذٍ سيمكننا الشكل 4.5 من حساب الفولتية عند أي زمان أومكان بوساطة التدقيق والتراكب فمثلاً عند $x = x_1$ فان $v_{x1} = 0$ ق $0 < t < (x_1/l)\tau$ و $v_{x1} = V e^{-\gamma x_1}$ ق $(x_1/l)\tau < t < \tau + (l - x_1)\tau/l)$ وهكذا ان أشكال موجات الفولتية / الزمن عند و المبينة على أساس الشكل بهذه أشكال موجات الفولتية / الزمن عند $x = x_1$ و $x = l$ المبينة على أساس الشكل 4.5 بهذه الطريقة تمعرضها في شكل 4.6 مع أخذ التبسيط $\gamma \to 0$ للسهولة . أي أن تغيرات الطوروالتوهين تم اهمالها . وفي شكل 4.6 ثم أخذ K_r موجباً وهذا يشيرالى أن $Z_2 > Z_c$. وشكل 4.6 يبين أنه بما أن الفولتية عبر Z_2 تختلفعن فولتيه التمور المسلطة V بالمقادير $K_r V$ و $-K_r^2 V$ و $K_r^3 V$ و...الخ للأنعكاسات المتتابعة (للأفتراضات المأخوذة) و $K_r < 1$ فان الفولتية عبر Z_2 ستقترب من فولتية الحالة المستقرة V .



شكل 4 5 انعكاسات الفولتية المتتابعة على طول الخط موضحة على مخطط(Bewley) المشبك



شكل 4.6 تغير الفولتية مع الزمن عند نقطتين في خط الشكل 4.5

4.4.2 نقاط الانهاء المقاومية ؛ نقاط اتصال الخطوط والقابلوات

RESISTIVE TERMINATION; JUNCTIONS OF LINES AND CABLES

بما أن الممانعة المميزة Z_c لخط نقل أوقابلومتوازن والتـي فرضنا أنها بدون مفاقيد ستكون $\sqrt{(L/C)}$ فانها ستكون مقاومة نقية Z_c . ان معامل الانعكاس عند نقطة انهاء مقاومية R بين موصل الخط والأرضـي تم اعطاؤه بالمعادلة [4.65] حيث أن $K_r = (R-Z_c)/(R+Z_c)$ والـــذي هـــورقـــم حقيقـــي . هـــذه النتيجة يمكن استنتاجها بطريقة مباشرة بما أن الفولتية عبر المقاومة = $v_f + K_r v_f = iR$

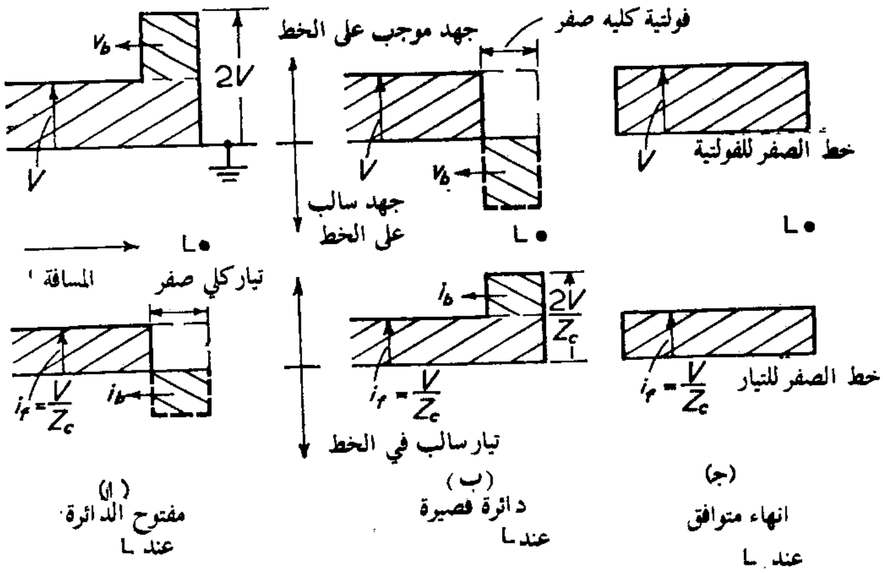
حيث أن $i = v_f/Z_c - K_r v_f/Z_c$ ان دائرة ثفنن المكافئة المتألفة من مصدر فولتية ذي فولتية مساوية لضعف فولتية التمور المسلطة أي $2V$ وذي مقاومة متوالية داخلية Z_c تمت أقلدتها الى مقاومة الأنهاء R يمكن أستعمالها لهذا الظرف واذا كانت $R = \infty$ فان الفولتية عند الطرف المفتوح ستكون $2V$. واذا حدث أن كان هناك قاطع دورة يربط خطاً طويلاً غير محمل الى المصدر عند لحظة فولتية الذروة فانه فضلاً عن التقليل البسيط بسبب مفاقيد الخط ستحاول الفولتية عند النهاية المفتوحة أن تصـل الى ضعف قيمة ذروة فولتية الطور (انظر الفقرة 2.12) . ولخط في حالـة دائرة قصيرة والذي تكون فيه $R = 0$ فان التيار يكون $2V/Z_c$ وبصورة عامـة فان التيار في R والذي هوكذلك التيار المرسل الى خط أو قابلو ثان اذا كان أحدهمـا مربوطاً هناك سيكون $2V/(R+Z_c)$. وموجة الفولتية المرسلة الى الخط أو القابلو الثانـي ذات الممانعة المميزة R هـي الفولتية عبر R وتساوي $2VR/(R+Z_c)$ والتـي يمكن استنتاجها من 4.64 لأنها هـي مجموع الأمواج الساقطـة والمنعكسة . وهكذا فان

$$\text{معامل الأنعكاس} = (R-Z_c)/(R+Z_c) \qquad [4.71]$$

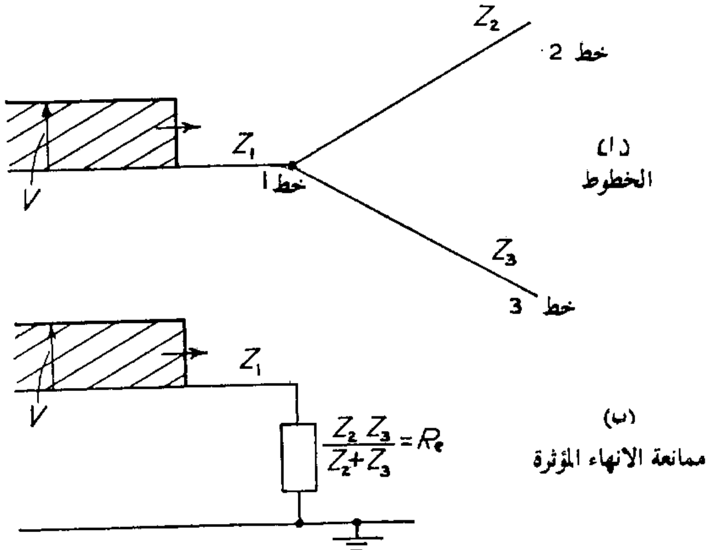
$$\text{معامل النقل} = 2R/(R+Z_c) \qquad [4.72]$$

وللحالات الثلاث المهمة التـي هـي دائرة قصيرة ودائرة مفتوحة ونقطـة أنهاء موافقة ($R = Z_c$) تكون موجات الفولتية والتيار لزمن قصير بعد وصول التمور الـى نقطة الأنقطاع كما مبينة في شكل 4.7 . وبما أن الممانعة المميزة لقابلو E.H.V. هي حوالـي 30 – 50 أوم بينما تكون لخط النقل حوالـي 250 الى 350 أوم فان الفولتية

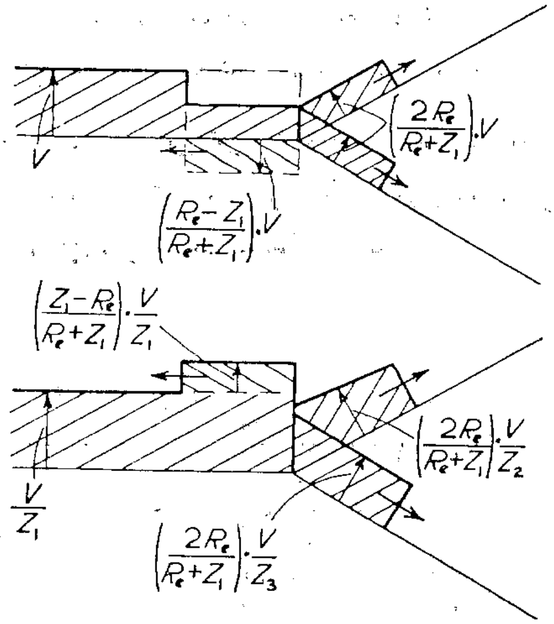
المرسلة من خط الى قابلو تكون ذات الرتبة $40/(40+300)$ أي أنها حوالي $\frac{1}{8}$ فولتية التمور المنتقلة على طول الخط . لهذا السبب يربط احياناً خط النقل الى المحطة الثانوية بقابلو ذي طول ربما يقل عن ميل واحد بحيث أن تمورات الصواعق او الأقلدة المنتقلة على طول الخط ستوهن كثيراً بوساطة القابلو وبذلك يقل أحتمال حدوث الشرر العرضي أو تلف الأجهزة في هذه المحطة الثانوية



شكل 4.7 انعكاسات الفولتية والتيار لثلاثة انواع من نقاط الانهاء



شكل 4.8 مباشرة قبل وصول التمور الى نقطة التقاء الخط مع خطين اخرين



شكل 4.9 مباشرة بعد وصول التمور الى نقطة التقاء الخط مع خطين اخرين

اذا كانت فولتية تمور V منتقلة على طول خط ذي ممانعة تمور Z_1 تصل الى نقطة التقاء خطين لهما ممانعتا تمور Z_2 و Z_3 (شكل 4.8) فان هذه . بقدر تعلق الأمر بالظروف الأبتدائية عند نقطة الألتقاء . ستكون مكافئة لمقاومة انهاء ذات $Z_2Z_3/(Z_2+Z_3) = R_e$. واذا كانت $R_e < Z_1$ فان موجة الفولتية المنعكسة على طول الخط الأول ستكون سالبة وكما في شكل4.9 .

بتطبيق نبضات الفولتية التي قد يكون لها أمد يقل عن زمن العبور للخط بصورة محسوسة . عند أحد طرفي خط حدث عنده العطل . فان اشارة التمورات المنعكسة الى الطرف نفسه ستؤشر فيما اذا كان العطل متوازياً أومتوالياً (موصل مقطوع) . والزمن المستغرق من قبل الموجة الساقطة للوصول الى العطل والموجة المنعكسة للرجوع سيبين حدي بعد العطل .

4.4.3 نقاط انهاء مفاعلية REACTIVE TERMINATIONS

عند أنهاء خط عديم الفقد بممانعة تحتوي على عناصر حثية وسعية فانه يمكن الحصول على الفولتيات الناتجة بوساطة تحويلة لابلاس (Laplace transformation) . في الحالات البسيطة ولنأخذ مثلاً سعة أو محاثة فان ممانعات هذه العناصر يمكن

أن تكتب $1/Cs$ و Ls على التوالي وستتغير الفولتيات والتيارات أسيا . اذا تم ربط تمور دالة وحدة ذات فولتية V الى خط منته بسعة متوازية C فارادغير مشحونة ابتداء . فان تحويلة لابلاس للفولتية المنعكسة ستكون من المعادلة [4.65] كما يلي

$$\mathscr{L}[v_b] = \left(\frac{(1/Cs)\ -Z_c}{(1/Cs)\ +Z_c}\right)\frac{V}{s}$$

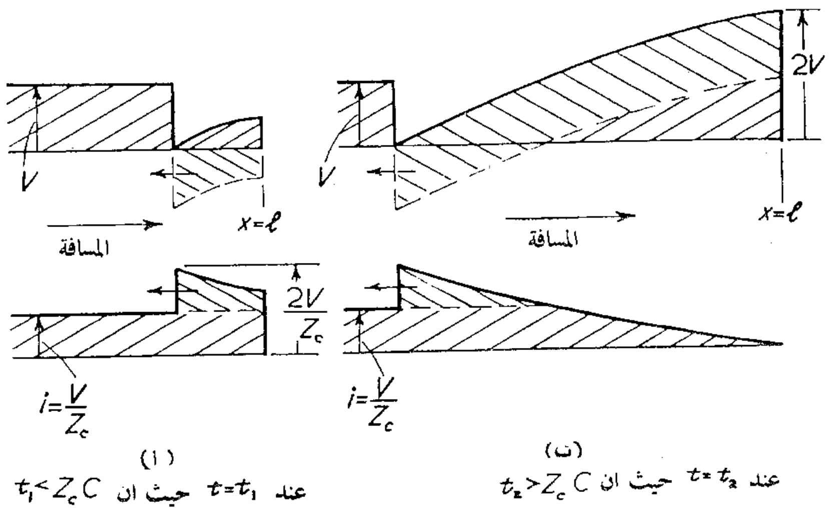
$$= \left[1 - \frac{2s}{s+(1/CZ_c)}\right]\frac{V}{s} \qquad [4.73]$$

ومن الجداول القياسية للتحويلات المعكوسة نحصل على

$$v_b = V(1-2\exp(-t/CZ_c)) \qquad [4.74$$

ويجب الملاحظة أن t مقاسة هنا من زمن وصول التمور الى السعة .

الفولتيات والتيارات تم توضيحها في شكل 4.10 . والتيارات تتبع المعادلات [4.15] و[4.16] و[4.74] . ان توزيعات الفولتيات والتيار المبين في شكل 4.10 وتغير زمن الفولتية المعطى بالمعادلة [4.74] كان من الممكن استنتاجه من حقيقة كون التمور المسلط قدتم افتراضه على أن له مقدمة موجة حادّة لانهائية بحيث أنها تحتوي على مدى من الترددات يمتد الى ما لانهاية . لذلك فان السعة تتصرف في البداية على أنها دائرة قصيرة بحيث ان الموجة المنعكسة ستكون سالبة وتجعل الفولتية عند تلك النقطة



شكل 4.10 الفولتيات والتيارات عند نقطة انهاء خط سعي

مساوية لصفر . بعد ذلك ستشحن السعة وبثابت زمن مقداره Z_cC حتـى تكون دائرة مفتوحة عندما تشحن تماماً وتكون الفولتية عندئذٍ $2V$.

ان الحالة المناظرة لمحاث متوازٍ ذي L هنري تعطـي تحويل الفولتية المنعكسة وكما يلي

$$\mathscr{L}[v_b] = \frac{(Ls-Z_c)}{(Ls+Z_c)}\frac{V}{s}$$

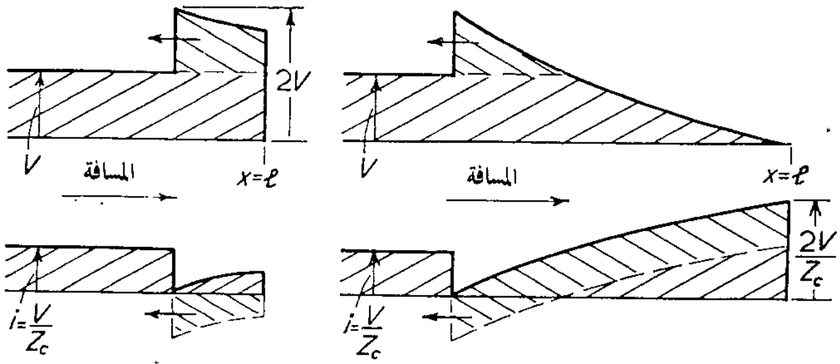
$$= \left[1-\frac{2(Z_c/L)}{s+Z_c/L}\right]\frac{V}{s} \qquad [4.75]$$

ومن التحويلات المعكوسة القياسية نحصل على

$$v_b = V(-1+2\exp[-(Z_ct/L)]) \qquad [4.76]$$

ان توزيعات الفولتية والتيار ستكون كما مبين في شكل 4.11 .

الفولتيات والتيارات لهذه الحالة هـي ثنائيات تلك التـي للأنهاء السعـي . ففـي اللحظة التـي يصل فيها التمور يبدو المحاث وكأنه دائرة مفتوحة وبذلك فان الفولتية تتضاعف والتيار يزداد بصورة أسية من صفر في L الى أن يكون مناظراً في الأخير لدائرة قصيرة اذا اهملنا مقاومة المحاث .



(أ)
$t=t_1$ حيث ان $t_1 < L/Z_c$

(ب)
$t=t_2$ حيث ان $t_2 > L/Z_c$

شكل 4.11 الفولتيات والتيارات عند نقطة انهاء خط محاثي

المراجع

BEWLEY, L. V. 1963. *Travelling Waves on Transmission Systems.* Dover, New York.

WEDEPOHL, L. M. 1963. Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. *Proc. I.E.E.*, **110,** No. 12, 2200–2212.

مسائل

1. احسب ممانعة التمور التقريبية لخط ذي طور واحد له نسبة مؤثرة لمباعدة موصل / نصف قطره =60 . (H.N.C.) (490 Ω)

2. خط نقل له سعة مقدارها 0·00778 μF/km ومحاثة 0·933 mH/km . خط النقل العلوي المعلق هذا مربوط الى قابو له سعة مقدارها 0·187 μF/km ومحاثة 0·155 mH/km . احسب الارتفاع في الفولتية الناتج عند نقطة ربط الخط والقابلو بسبب تمور فولتية ذي قيمة ذروة 50 كيلو فولت على طول القابلو .

(H.N.C.) (92·3 kV)

3. أوجد تعبيراً رياضياً تقريبياً بالنمط الأسي لشكل موجة 0·5/5 μs . أفرض أن الشكل الأسي الذي سيحكم مقدمة الموجة سيهمل عندما تكون قد هبطت الى 0·002 .

(H.N.C.) ($v = V(e^{-0\cdot139t} - e^{-12\cdot4t})$)

4. قابلو طوله 1 كم ذو ممانعة تمور 80 أوم تم ربطه بين خط علوي معلق طويل ومحطة ثانوية . المحول في المحطة الثانوية يجعل نقطة الانهاء المؤثرة للقابلو مقاومة قيمتها 10 000 أوم . وتمور فولتية مقداره 90 كيلو فولت يظهر في الخط وينتقل باتجاه القابلو والمحطة الثانويه . سرعة الموجة في القابلو هي 10^{10}سم / ثانية. ماهي الفولتية عند المحول في اللحظة التي يحدث فيها ارتفاع الفولتية الثاني هناك وما المدة بعد وصول تمور الـ 90 كيلو فولت أولا الى نقطة الألتقاء بين الخط والقابلو المستغرقة لحدوث ذلك .

(جامعة رانكون) (98·5 kV, 30 μs)

5. نهايتا خطي نقل طويلين A و B مربوطتان بقابلو C طوله 1·5 كم . الخطان لهما سعة 10 بيكوفاراد · متر ومحاثة $1\cdot6 \times 10^{-6}$ هنري متر . موجة فولتية مستطيلة مقدارها 10 كيلو فولت ذات أمد طويل تنتقل على طول الخط A باتجاه القابلو . أوجد مقدار ارتفاع الفولتية الثاني الذي سيحدث عند نقطة التقاء القابلو والخط B . ماذا ستكون الفولتية عند نقطة التقاء الخط A والقابلو بعد 20 مايكروثانية من وصول التمور الابتدائي الى هذه النقطة .

(جامعة ليدز) (7·8 kV, 6·79 kV)

6. خط طويل مربوط الى قابلو طوله 1 كم طرفه البعيد معزول . للخط سعة 0·114 بيكوفاراد / سم ومحاثة $0·978 \times 10^{-8}$ هنري / سم والقابلو له سعة 1·36 بيكوفاراد / سم ومحاثة $0·75 \times 10^{-8}$ هنري / سم .

تمور مستطيل مقداره 10 كيلوفولت ينتقل على طول الخط باتجاه القابلو . احسب الفولتية على القابلو عند منتصفه بعد 38 مايكروثانية من وصول التمور الابتدائي عند نقطة التقاء القابلو والخط . (12·8 kV)

7 تمور مقداره 500 كيلو فولت على خط علوي معلق طويل ذي ممانعة مميزة 400 أوم يصل عند نقطة حيث يستمر الخط لقابلو AB طوله 1 كم له محاثة كلية 264 مايكروهنري وسعة كلية 0·165 مايكروفاراد . تم ربط محول ذي ممانعة مميزة 1000 Ω الى الطرف البعيد للقابلو . للتمور من ارتفـاع مهمل وقيمة ذروة يمكن أن نعدها باقية على قيمة ثابتة عند 500 كيلو فولت ولزمن أطول من الأزمنة العابرة المتضمنة هنا .

ارسم منحنى الفولتية مع الزمن للفولتية عند نقطة التقاء A من القابلو لمدة 26·4 مايكروثانية بعد وصول التمور الأصلي عند نقطة الالتقاء هذه . استعمل المخطط المتدرج لتوضيح الأنعكاسات على طول القابلو .

(L.C.T.) (91 kV الى حد 13·2 μs , 243·75 kV من 13·2 الى 26·4 μs وترتفع الى 359·25 kV عند 26·4 μs)

8 . تمور مستطيل مقداره 100 كيلو فولت وذو مدى 20 مايكروثانية ينتقل على طول خط ذي ممانعة تمور 500 أوم وذي طول 100 000 متر وبسرعة 3×10^8 متر / ثانية باتجاه نقطة التقاء الخط مع القابلو . القابلو طوله 400 متر وله ممانعة تمور 50 أوم وسرعة التمور فيه هي 2×10^8 متر / ثانية . عند طرف القابلو البعيد يوجد محول يمكن عده مجموعة تواز متألفة من سعة 100 مايكرومايكروفاراد ومحاثة 0·5 هنري مربوطة بين لب القابلو والأرضي .

أحسب الفولتية التقريبية عبر المحول بعد 6 مايكروثانية من وصول التمور المنتقل على طول الخط الى نقطة التقاء المحول بالقابلو .

اذا وصل التمور نفسه منتقلا على طول خط مشابه الى النقطة التي تم انهاء الخط فيها بسعة مقدارها 2×10^{-2} مايكروفاراد مربوطة بين الخط والأرضي فأحسب الفولتية القصوى التي ستظهر عبر المتسعة .

جامعة ليدز (174·3 kV 66·2 kV,)

9 . قابلو طوله 20 كم يربط خطين علويين معلقين A و B له ممانعة تمور 400 أوم . محاثة وسعة القابلو هما 0·01 هنري و 1·78 مايكروفاراد .
اذا أقترب تمور مستطيل مقداره 10 كيلو فولت ذو مدى 350 مايكروثانية من الخط A . فأحسب الفولتية الكلية عند نقطة التقاء القابلو والخط B بعد 410 مايكروثانية و 500 مايكروثانية من وصول التمور الابتدائي الى نقطة التقاء الخط A والقابلو .
ما السماحية المؤثرة لعازل القابلو .
جامعة ليدز (7·81 kV ، 2·49 kV ، 4)

الفَصلُ الخامِسُ

تنسيق العزل

INSULATION CO-ORDINATION

5.1 مقدمـــة

تنسيق العزل هو ايجاد العلاقات المتبادلة لمتانات العزل للمكونات المختلفة لمنظومة القدرة ذات الفولتية العالية لتقليل التلف وفقدان التجهيز بسبب الفولتيات المفرطة . فالجهات المسؤولة عن تجهيز القدرة الـكهربائيـــة عند تخطيطها للمنظومة اخذة بنظر الاعتبار مواصفات فحوص الفولتية المفرطة للاجهزة تحاول تقليل انقطاعات التجهيز كلما كان ذلك ممكنا من الناحية الاقتصادية . الخطوات المتصلة بهذا الصـــدد هـــي :

(1) ضمان صمد عزل المنظومـــة ضد كل اجهادات الاشتغال الاعتيادية واغلـــب الاجهادات غير الاعتيادية . .

(2) تفريغ اوتحويل مسار الفولتيات المفرطة التي تتجاوز قوة صمد الاجهزة .

(3) ضمان كون الانهيارات ستحدث بوساطة الشرر العرضـــي الخارجـــي بدلا من الاخفاق الداخلي للاجهزة مثل الخرق او انهيار المواد العازلة الصلبة او السائلة .

(4) السيطرة على النقاط التي يمكن ان يحدث عندها الانهيار في ضوء الاهمية النسبية للمفردات المختلفة للاجهزة .

فللمسألة اذا هي موازنة كلفة العازل الموصوف القادر على الصمد امام الفولتيات الاعلى بدون شرر عرضي اوتلف . اضافة الى كلفة تجهيز اجهزة حماية اكثر واحسن . ضد امكانية تلف الاجهزة وقساوة انقطاعات التجهيز التي يمكن تخمين حدوثها . موضوع كهذا يعتمد الى حد كبير على الرأي الهندسي والخبرة للاحتمالات العديدة والميزات البارزة الاحصائية الاخرى . ولاقتصاديات البدائل المختلفة . التي ليس من السهولة معاملتها

باختصار في كتاب منهجي . ولـكننا سنقوم بمحاولة ايجاز بعض النقاط الرئيسية . ان الظروف التي ستناقش في هذا الفصل تطبق بصورة خاصة على منظومة الشبكة الرئيسية البريطانية . ولاتطبق على الحالات الاخرى كلها . والمناطق الحارة تضيف مشاكل خاصة اخرى (انظر مثلا Golde 1956) ونفس الشيء ينطبق على منظومات الـ d.c. (انظر الفقرة 5.7)

5.2 الفولتيات المفرطة Over-voltages

الفولتيات المفرطة في منظومة القدرة قد تكون عند تردد المنظومة او نتيجة لتمورات عابرة ذات مركبات تردد عالية ان . الفولتيات المفرطة عند تردد المنظومة سيتم التعليق عليها بصورة مختصرة في الفقرة التالية والفولتيات المفرطة نتيجة لصاعقة اونتيجة للاقلدة ستبين في الفقرة التي تليها . وتتألف الاخيرة بصورة رئيسية من فولتيات الاسترداد العابرة للتردد الطبيعي المتذبذب حول فولتيات تردد المنظومة عند فتح او غلق قواطع الدورة . ورغم ان هذه لن نتعامل معها في هذا الفصل لاننا ناقشناها بشيء من التفصيل في الفصل 2 الا انه لاهمية تمورات مقدمة الموجة الطويلة نسبيا في انهيار الفجوات الطويلة في منظومات الفولتية الفائقة العلو (E.H.V) اعلاه . فوق حوالي 300 كيلوفولت . فقد تمت الاشارة اليها في الفقرة 5.4. بعض المناقشات عن تمورات مقدمة الموجة القصيرة نسبيا التي تسببها الصاعقة والتي يحتمل ان تتعدى تمورات الاقلدة في منظومات التوزيع او منظومات النقل الواطئة ستبين في الفقرة 5.2.3 .

يُعَرَّض معدات المنظومة دائما الى فحوص الفولتية المفرطة عند تردد القدرة لفترة دقيقة واحدة بصورة عامة وجدول 5.2 في الفقرة 5.3 يبين مستويات الفولتية بين حوالي 1·5 - 2 مضروبة بالفولتية المقننة التي تسلط على محولات القدرة . ولسنين عديدة تم تعريض المعدات الرئيسية الى فحوص فولتية دفعية قياسية تتجاوز فيها فولتيات الذروة فولتية فحص تردد القدرة الذروة وكما مبين في الجدولين 5.1 و 5.2. والهدف من ذلك هو تأمين عزل مناسب الى الارضي للصمد ضد تمورات الصواعق . هناك اعمال جارية . وفي تقدم مستمر . في السنين الاخيرة لتحديد استطاعة عزل منظومة الـ E.H.V للصمد ضد تمورات الاقلدة .

5.2.1 الفولتيات المفرطة عند تردد المنظومة

SYSTEM-FREQUENCY OVER-VOLTAGES

تحت ظروف الحالة المستقرة قد تتجاوز الفولتية عند تردد – المنظومة الفولتية المقننة في بعض اجزاء المنظومة بحيث انه يجب عزل المعدات لاعلى فولتية منظومة . مثلا 300 كيلوفولت بالنسبة الى منظومة 275 كيلوفولت . وقد تحدث احيانا زيادات اكبر في الفولتية عند تردد المنظومة وتمتد لفترة ثوان قليلة اواقل من ذلك . في مثل ظروف فقدان حمل على مولد (الى حد حوالي 20% للتوربين البخاري و 30% للتوربين المائي) اوفتح قاطع دورة عند نهاية الاستلام لخط طويل (الى حد 90% تحت ظروف غير محبذة على الخصوص) . تشويه التوافقيات يمكن ان يزيد في بعض الاحيان من اجهادات الذروة المسلطة على الاجهزة . واذا حدث عطل أرضي على طورواحد فان الفولتيات الى الأرضي للطورين الاخرين قد تتجاوز نسبة الـ 58% الاعتيادية لفولتية الخط (طورالى طور) وحتى يزال العطل اذا كان . مثلا . محايد المنظومة غير مؤرض او مؤرضا خلال ملف خامد لقوس الشرارة (Petersen) . مفاعلة ملف خامد قوس الشرارة تكون ذات قيمة بحيث انها تولد تداخلا مع سعة المنظومة خلال عطل ارضي على طورواحد بحيث ان تيار السعة خلال العطل ستتم معادلته والفولتية عبر مسار العطل بعد تيار الصفر فيها ستزداد ببطء نسبيا . نتيجة لذلك فان الشرر العرضي بين طورواحد والارضي . وهو العطل الاكثر شيوعا . والذي قد يكون نتيجة لشرر عرضي لسلسلة عازل بسبب صاعقة سيطفأ ذاتيا بصورة عامة . بعد مرور تيار الصاعقة بحيث انه يمكننا تجنب سريان القدرة خلال قوس الشرارة الذي سيسبب اشتغال قاطع الدورة . وعند استعمال ملف باترسون Petersen coil اواذا كان المحايد غير مؤرض فانه من الممكن للفولتيات الى الارضي على طورين ان تصل الى 100% من فولتية الخط نتيجة لعطل ارضي على طور واحد او الى تسرب غير متوازن الى الارضي . ان محايدات المنظومة نادرا ماتترك معزولة (الا عند الفولتيات الواطئة احيانا) بسبب الفولتيات المفرطة مثل تلك التي تحدث اذا كان قوس الشرارة الى الارضي على طور واحد غير مستقر (قوس شرارة ارضي) . عندها قد تنشأ ظروف مماثلة لتلك التي في الفقرة 2.10 (انظر شكل 2.11) . اما اذا كان المحايد مؤرضا مباشرة او عبر مقاومة او ملف مفاعل فان الفولتية الى الارضي للاطوار المعنية ستعتمد على نسب المقاومة R_0 والمفاعلة X_0 للتتابع الصفري الى مفاعلة التتابع الموجب X_1 للمنظومة . اذا كانت $1 < X_0/X_1 < 3$ و $R_0/X_1 < 1$ فان الفولتية القصوى الى الارضي خلال عطل ارضي على طور واحد سوف لاتتجاوز 80% من فولتية الخط ويقال

ان المنظومة مؤرضة بصورة مؤثرة اما فيما يخص المنظومات التي يمكن لفولتيتها ان تتجاوز هذه القيمة فيقال عنها انها مؤرضة بصورة غير مؤثرة .

5.2.2 الفولتيات المفرطة العابرة : TRANSIENT OVER-VOLTAGES

الفولتيات المفرطة العابرة يمكن ان تكون متولدة داخليا في المنظومة اومتولدة خارجيا ويمكن تقويمها بوساطة عامل الفولتية المفرطة الذي هو النسبة بين الفولتية المفرطة الذروة وفولتية طور تردد المنظومة الذروة المقننة للمنظومة ويمكن ان يشار لهذه النسبة كذلك بوصفها عامل اتساع او نسبة وحدة (p.u.).

الفولتيات المفرطة الداخلية الناشئة من تغيرات انقطاع فجائية في ظروف المنظومة تكون في اغلب الحالات نتيجة لفصل او دمج اجزاء من المنظومة الى الدائرة او منها . وقد تمت مناقشة ذلك في الفصل 2 . اما فيما يخص علاقتها بالشرر العرضي لعزل المنظومة فستناقش في الفقرة 5.4 .

ان اشتغال المصهريمكن ان يسبب كذلك فولتيات مفرطة نتيجة للتكون السريع لعدد كبير من أقواس الشرارة المتوالية. لذلك ترفض المصاهرعند عوامل فولتية مفرطة تتغير من حوالي 6·8 عند 3·3 كيلوفولت الى 2·7 عند 132 كيلوفولت . رغم ان تصميم العناصر غالباً مايقصر فولتيات الذروة الخاصة بها الى عوامل تقرب من 5·5 و 2·2 على التوالي عند فولتيتي المنظومة هاتين .

السبب الرئيس للفولتيات المفرطة العابرة باستثناء الأقلدة هو الصواعق وفي المنظومات ذات الفولتية الواطئة تسبب الصواعق فولتيات عابرة أعلى. وعند حوالي 200 الى 300 كيلوفولت يكون لمقادير الفولتيات المفرطة نتيجة للأقلدة والصاعقة الرتبة نفسها بينما اذا كانت الفولتية أعلى من 300 كيلوفولت تنتج الأقلدة تمورات أكبر. أما الفولتيات المفرطة الخارجة بسبب الصواعق فان لها فولتية ذات معدل ارتفاع أكبر كثيراً من تمورات الأقلدة وسيناقش ذلك في الفقرة القادمة .

5.2.3 الفولتيات المفرطة نتيجة للصواعق

OVER-VOLTAGES DUE TO LIGHTNING

سحابات الرعد التي يحدث منها تفريغ الصاعقة تتكون بوساطة الهواء الرطب الدافيء الصاعد الذي يتحول الى قطرات ماء عند برودته. ان تيارات الهواء الصاعدة المؤثرة في جزيئات الماء المعلق والثلج تسبب فصل شحنة بين المناطق العليا والسفلى للسحابة ومعظم ضربات الصواعق تحدث من غيوم لها مناطق عليا ذات شحنة موجبة وماتبقى يكون ذا شحنة سالبة الا بعض الشحنات الموجبة المحلية في أجزاء من قاعدة الغيمة. وضربة الصاعقة تتألف بصورة أساسية من مركبتين. الضربة المتقدمة من السحابة التي تنشيء قصاصة طويلة ضيقة متجهة الى الأعلى من بعض التخلخلات على الأرض وتكمل قناة توصيل تمر الضربة الراجعة بعد ذلك على طولها. وفي كثير من الحالات تكون الضربة مركبة وتحتوي على عدد من الضربات المتقدمة والراجعة. والضربة الراجعة التي يصل التيار الى ذروته في مسارها، قد يكون لها تيار منخفض الى حد مئات الامبيرات ولكن في اغلب الاحيان يكون التيار بين عدد قليل من الكيلوأمبير والى حوالي 100 كيلوامبير وقد تم تسجيل تيار يصل الى 180 كيلو امبير في تفريغ كهربائي من سحابة ذات أساس مشحون بشحنة موجبة. حوالي نصف عدد ضربات الصاعقة يتعدى 15 كيلوامبير و 10% يتعدى 50 كيلو أمبير وحوالي 1% يتعدى 130 كيلو أمبير وحوالي 80% تكون لها قطبية سالبة، أي أن شحنة سالبة تجري الى الأرض. ويكون شكل موجة التيار بصورة عامة ذا نبضة احادية الأتجاه تزداد الى قيمة الذروة في حوالي 3 مايكرو ثانية وتهبط الى قيم صغيرة خلال بضع عشرات من المايكروثانية.

ان الصاعقة يمكن ان تسبب نوعين من تمورات الفولتية. احدهما يتولد بوساطة ضربة غير مباشرة عندما تتبدد الشحنات المقيدة بعد تفريغ شحنة الصاعقة الى جسم قريب من موصل الخط والآخر بوساطة ضربة مباشرة على موصل الخط. في حالة الضربة غير المباشرة تسبب الشحنة السالبة في قاعدة السحابة تقييد الشحنات الموجبة على موصلات خط نقل مجاور، وتفريغ الشحنة من السحابة نتيجة لضربة صاعقة في المناطق المجاورة يسبب ارتفاع جهد الموصل الى v لأن مقاومة العزل العالية تمنع التبديد العاجل للشحنة. ان تمور الفولتية المتولد له قيمة ذروة $v \simeq Eh$ حيث ان E هي متوسط المجال الكهربائي قرب سطح الأرض تحت سحابة الرعد (والذي قد يصل الى 50 اوقد يصل الى حد 280 كيلوفولت / متر)، و h هو ارتفاع موصل الطور فوق الأرض. وبتطبيق

المعادلتين [4.17] و[4.18] على هذه الحالة عندما يكون تيار الموصل الكلي $i = 0$ فستحصل على $i_f = -i_b$ و $v_f = v_b = v/2$ وبذلك ستتكون موجات منتقلة متقدمة ومتأخرة للفولتية والتيار باتجاهين متعاكسين على طول خط النقل من المكان الأقرب الى نقطة تفريغ السحابة. واتساعات الفولتيات المتولدة بصورة غير مباشرة بوساطة ضربات صاعقة على برج أو الى سلك ارضي أو ارض قريبة او جسم قريب تكون عادة أقل بكثير من تلك التي سببها ضربات صاعقة مباشرة على موصل الخط ولكنها ذات اهمية في منظومات 33 كيلو فولت وأقل وقد تكون ذات أهمية حتى في فولتيات أعلى من هذه الفولتية .

التيار عند الضرب المباشر على موصل طور قليلاً مايتأثر بالفولتية التي تنشأ بين الموصل والأرض بحيث ان ضربة الصاعقة ستشابه مصدر تيار ثابت تقريباً . واذا جرى تيار I في ضربة صاعقة على موصل طور فستتكون تيارات منتقلة أمامية وخلفية i_f و i_b كل منها يساوي $I/2$ تجري في الموصل مبتعدة عن نقطة الضرب بحيث ان جهد موصل الطور هذا الى الأرض سيرتفع بالمقدار $IZ_c/2$ حيث ستكون الممانعة المميزة لخط الـ E.H.V حوالي 350 أوم . وبما ان أكثر من نصف تيارات الصواعق تتجاوز الـ 10 كيلو أمبير فان ارتفاع الفولتية على الأغلب يسبب شرراً عرضياً لعازل الخط الا عند فولتيات النقل العالية جداً لأن فولتيات الشرر العرضي الدفعية النموذجية لخطوط نقل علوية معلقة على أبراج فولاذية تكون حوالي 760 الى 1100 كيلو فولت لخطوط 132 كيلو فولت و 1440 الى 1950 كيلو فولت لخطوط 275 كيلو فولت . من جهة أخرى فان تموز الصاعقة سيوهن بعجالة الى حد ما نتيجة للهالة عند انتقاله على طول الخط . وامكن ان يقلل عدد الضربات المباشرة على موصلات خط بوساطة سلك ارضي (أو سلكين) يثبت في أعلى البرج فوق موصلات الخط . من جهة ثانية فانه حين تفريغ تيار الصاعقة من السلك الارضي اومن اي جزء آخر مؤرض من الهيكل الى الارض فان مقاومة قاعدة البرج ذات القيمة العالية (والى حد ما بمساعدة محاثة البرج للأبراج العالية جداً) قد تجعل الفولتية الى الأرض عند قمة البرج عالية الى حد قد يحدث معه شرر عرضي خلفي من الجسم المعدني للبرج عبر سلسلة العازل الى موصل الطور. وسيكون تقليل مقاومة قاعدة البرج الى أقل من حوالي 10 أوم غير ذي فائدة عادة لأن محاثة البرج ستكون ذات قيمة مسيطرة عند أقل من هذه القيمة .

سقوط الصواعق يختلف الى حد كبير من مكان الى آخر في العالم . وهناك جزء واحد من معلومات الارصاد الجوية له علاقة بموضوعنا ألا وهو منسوب الأيسوسيرونـــك

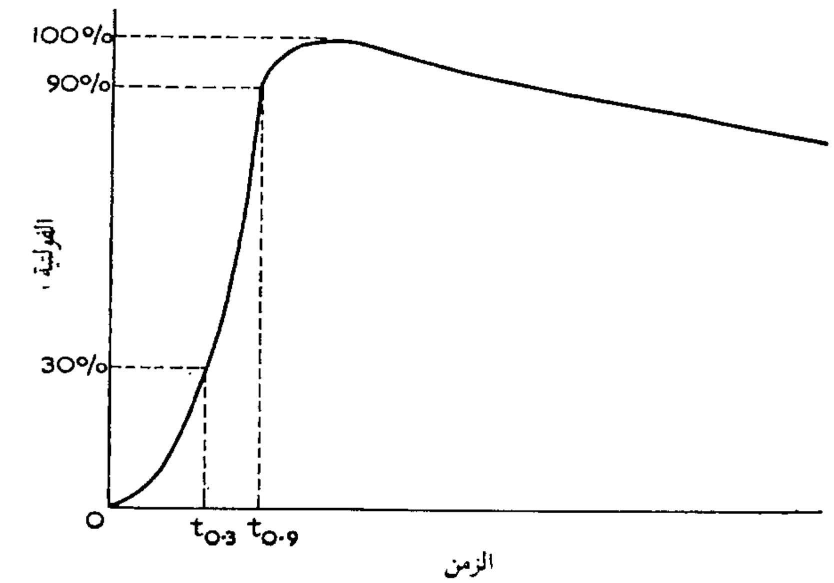
(isoceraunic) والذي هو عدد أيام السنة التي يسمع فيها الرعد فبينما يكون المعدل في بريطانيا حوالي 10 فقط قد يتجاوز المعدل 100 في بعض المناطق الحارة . والعامل ذو العلاقة المباشرة أكثر هو عدد ضربات الصاعقة الى الأرض للميل المربع في السنة ، والذي يصعب تحديده . ويمكن أن يتغير من حوالي منسوب الايسوسيرونك الى ثمنه ، مع معدل يتغير من حوالي النصف للمناطق المعتدلة الى ثلث في المناطق الحارة . ان معدل عدد ضربات الصاعقة للميل المربع في السنة في بريطانيا يبلغ حوالي 4 .

5.3 مستويات الفحص الدفعي للمعدات

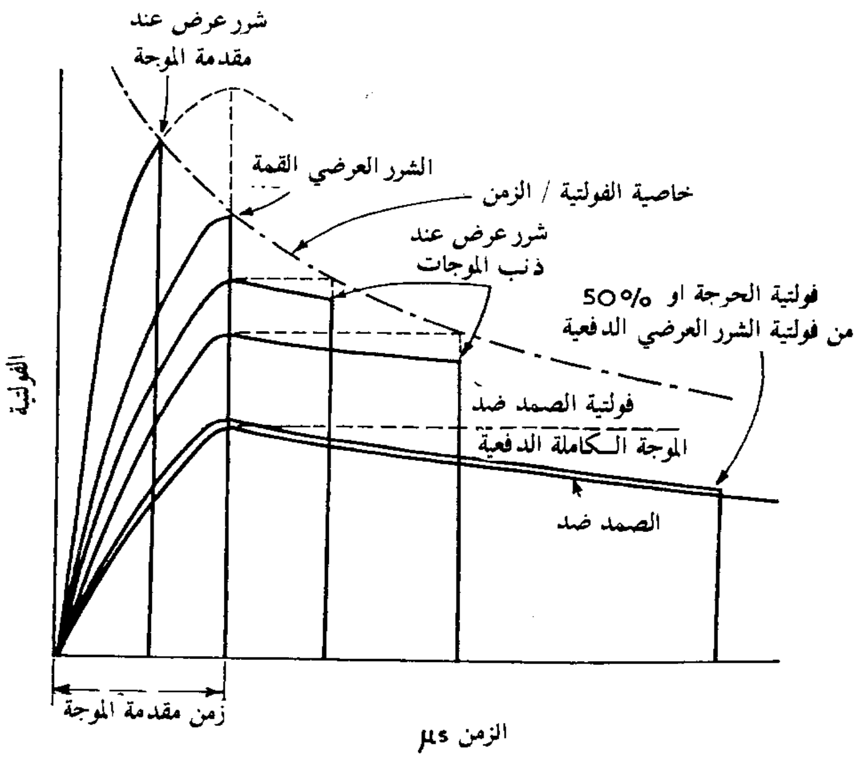
Impulse test levels of equipment

قوة الصمد الدفعية ضد الصاعقة لمعدات المنظومة يمكن تحديدها بتسليط موجة دفعية قياسية ذات فولتية $v = v_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ حيث أن α و β تكونان ذواتي رتبة 1.5×10^4 و 6×10^6 (ثانية $^{-1}$) على التوالي لموجة الـ 1/50 ذات الزمن t المقاس بالثواني . يمكن الحصول على هذه الموجة من مولد دفعي يتكون بصورة أساسية من متسعات تشحن على التوازي وتفرغ على التوالي . وشكل موجة الـ 1/50 القياسي في بريطانيا العظمى له زمن من قيمة صفر الى قيمة الذروة مقداره 1 مايكروثانية ويهبط الى نصف قيمة الذروة في 50 مايكروثانية (أنظر شكل 4.2) . من الصعب قياس زمن مقدمة الموجة t_1 مباشرة من الرسم التذبذبي و t_1 يمكن أن تقدر في بعض الأحيان بدلالة الأزمنة التي قد تصل 90% و 30% (أو 10%) من قيمة الذروة بوساطة العلاقة $t_1 = 1.67(t_{0.9} - t_{0.3})$. أنظر شكل 5.1 .

عندما تعطي الأجهزة التي يجرى عليها الفحص ، عند الفحص الدفعي ، شرراً عرضياً فانها ستقطع ، موجة الفولتية الدفعية ، وكما مبين في شكل 5.2 فهذه قد تحدث عند مقدمة الموجة اذا كانت فولتية الذروة عالية بدرجة كافية أو عند ذنب الموجة لفولتيات ذروة أقل . شكل 5.2 يبين أن المحافظة على ثابت زمن مقدمة الموجة (لنقل عند 1



شكل 5.1 شكل موجة الفو لتية الدفعية



شكل 5.2 خاصية الفولتية / الزمن للمعدات تحت فحص الفولتية الدفعية

مايكروثانية) ورفع فولتية الذروة تدريجيا من قيم منخفضة نسبيا فاننا نصل الى أعلى فولتية ذروة يمكن للجسم المفحوص أن يتحملها دون أن يحصل شرر عرضي . وقيمة الذروة أوالقمة هذه هي فولتية الصمد الدفعية ذات الموجة الكاملة وكلما ارتفعت الفولتية تدريجيا فوق هذه القيمة فاننانصل الى قيم تدعى بفولتيات احتمالية الشرر العرضي الدفعية ذات الـ 10٪ و 50٪ و 90٪ لاننا اذا كررنا تسليط هذه الفولتيات الدفعية (عند فترات مناسبة) فانه سيحصل شرر عرضي في الجسم المفحوص عند حوالي 10٪ و 50٪ و 90٪ من تسليطات الفولتية . واذا استمررنا في رفع فولتية الذروة الى أبعد من ذلك فان الشرر العرضي سيحدث مبكراً . ويكون عند ذنب الموجة أكثر تبكيراً وهكذا حتى يحدث عند القمة ، وعند فولتيات أكثر من ذلك سيحدث الشرر العرضي عند مقدمة الموجة . الخط الرابط لكل نقطة معطاة بوساطة قيمة فولتية القمة لشرر عرضي لذنب الموجة أو فولتية الشرر العرضي الفعلية للشرر العرضي لمقدمة الموجة والزمن المناظر بعد الفولتية صفر التي يحدث عندها الشرر العرضي يعطينا خاصية الفولتية / الزمن للجهاز المعني . ويمكن تعريض محولات القدرة الى تغير مفاجيء في الفولتية لكي يتم فحص عزل اللفة الداخلي عن طريق تسليط فولتية دفعية تقطع الى الصفر بوساطة شرر عرضي لفجوة هوائية على التوازي مع الجسم المفحوص بعد فولتية القمة بـ 2 أو 3 مايكروثانية . يمكن للأجهزة بعد ذلك أن تصمد ضد فولتية قمة أعلى مالم يسبب قطع الفولتية المفاجيء شرراً عرضياً أو اخفاقاً في العزل . كما يبين شكل 5.2 . ومحول 132-kV له فولتية صمد دفعية موجة كاملة 550-kV قد تكون له فولتية صمد موجة مقطعة 630-kV . ولأغلب عوازل المنظومة وبضمنها الفجوات الهوائية وعوازل الدعامة والمعلقة تكون خاصية الفولتية / الزمن أعلى للفولتيات الدفعية ذات القطبية السالبة منها للقطبية الموجبة على مدى مقياس الزمن المدرج بعضه اوكله رغم أن بعض العوامل الأخرى مثل اضافة ملحقات قوس شرارة الى سلسلة عازل يمكن أن تحور هذا أو قد تعكسه . ولفجوات قضيب / مستوي في الهواء الجوي تكون نسبة فولتية الأنهيار السالبة (أي القطب النقطي بوصفه مهبطاً) حوالي 2.2 مضروبة بتلك للقطبية الموجبة والى حد أطوال فجوات ذات عدة أمتار بينما لاتكون نسبة فجوات قضيب / قضيب أكثر من واحد . وتكون نسبة فولتية الشرر العرضي الدفعية 50٪ الى قيمة الذروة لفولتية الشرر العرضي عند تردد القدرة أكثر من واحد الى حد ما لأغلب العوازل .

معدات المنظومة لها فولتيات فحص دفعية محددة فمثلاً المواصفات القياسية البريطانية B.S. 116 تحدد مستويات الفولتيات الدفعية بـ 1/50 لقواطع الدورة الزيتية المستعملة خارج الابنية والجدول 5.1 يبين قسماًمقتبساً من هذه المواصفات . وتطبق هذه المناسيب بصورة عامة على المحولات كما أشير اليها في الجدول 5.2 (والذي يعطي

فولتيات فحص تردد القدرة كذلك) وهي تتوافق بصورة جيدة مع مستويات العزل الأساسي للمواصفات القياسية الأمريكية (B.I.L.s) اضافة الى الخبرة في المناسيب التي يمكن عندها لمانعات تحويل التمور أن تعطي الحماية اللازمة .

جدول 5.1 (B.S. 116) فولتيات فحص دفعية لقواطع دورة زيتية

كل قواطع الدورة لمنظومات الى حد 88 kV	المنظومات المؤرضة بصورة مؤثرة kV	المنظومات المؤرضة بصورة غير مؤثرة kV	الفولتية المقننة للمنظومة kV
200	—	—	33
—	550	650	132
—	1050	*	275

* كل منظومات 275-kV تعد مؤرضة بصورة مؤثرة لأغراض هذه المواصفات

جدول 5.2 (B.S. 171)

مواصفات قياسية 2 مستوى العزل		مواصفات قياسية 1 مستوى العزل		
فولتية فحص تردد قدرة kV r.m.s.	فولتية فحص دفعية ذروة kV	فولتية فحص تردد قدرة kV r.m.s.	فولتية فحص دفعية ذروة kV	الفولتية العليا للمنظومة
115	300	140	350	72·5
230	550	275	650	145
395	900	460	1050	245
460	1050	—	—	300
630	1425	—	—	420

المواصفة القياسية 1 لمستوى العزل تطبق عادة على المنظومات ذات المحايد المعزول أو المؤرضة خلال ملف اخماد قوس الشرارة أو المؤرضة بصورة غير مؤثرة خلال ممانعة محايد . المواصفة القياسية 2 لمستوى العزل تطبق عادة على المنظومات ذات المحايد المؤرض بصورة مؤثرة .

هناك عوامل أخرى مثل المطر ، وتلوث سطح العازل والأرتفاع يمكن أن نتعامل معها عن طريق فحوص تحت ظروف مصطنعة للمطر أو التلوث . مسافات التقدم التدريجي

الأدنى على العوازل . وهناك زيادة تقارب 3·5% في فولتيات صمد الحالة الرطبة الدفعية وتردد القدرة لكل 300 م زيادة عن 1000م فوق سطح البحر .
دراسة السلوك التفصيلي للمحولات وللمكائن الدوارة عند تسليط فولتيات تمور على أطرافها يعد من مهام مصممي هذه الأجهزة أكثر منها لمهندسي تحليلات القدرة ونظراً لمحدودية المجال المتوفر فان هذه الظواهر لن تناقش في هذا الكتاب .

5.4 قوة تمور الاقلدة للعازل في منظومات الـ E.H.V

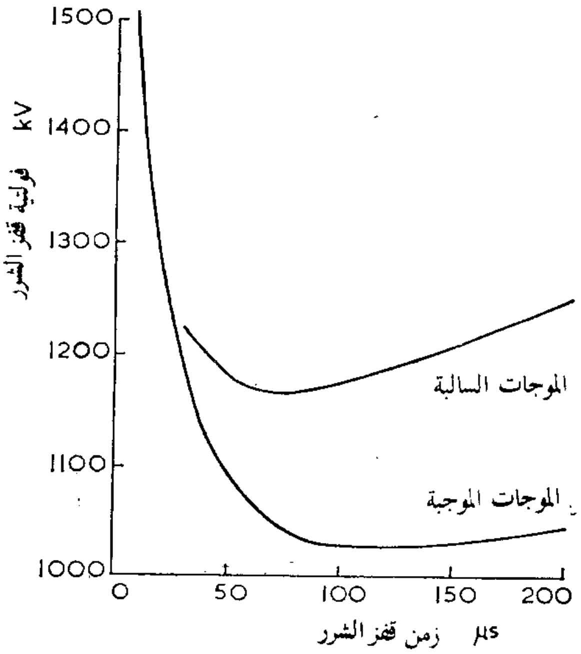
Switching surge strength of insulation in E.H.V. systems

ان اتساعات تمورات الأقلدة وقوة تمور الأقلدة لعزل المحطات الثانوية للخطوط العلوية المعلقة هي من العوامل المهمة جداً في أختيار مستويات العزل وفي تنسيق العزل لمنظومات الـ E.H.V وخصوصاً تلك التي تعمل عند حوالي 300 kV فأكثر . وذلك يعود للأسباب التالية :

(أ) يكون احتمال الأنهيارات التي تسببها الفولتيات المفرطة المتكونة في منظومات الـ E.H.V. أقل عند فولتيات المنظومة الأعلى لأنها ستكون أوطأ نسبة الى قوة العزل منها عند فولتيات المنظومة الأخفض . زيادة على ذلك تنشأ تمورات الصاعقة عادة في خطوط النقل وتقل حدة أنحدارها وتوهن جزئياً نتيجة للهالة . وتتقطع اذا حدث شرر عرضي في الخط . من ناحية ثانية فان تمورات الأقلدة الناشئة عند نقاط وجود معدات رئيسية ترتفع اتساعاتها مع ازدياد فولتية المنظومة ويمكن أن تتجاوز قوة عزل المعدات في منظومات الـ E.H.V. . وغالباً ماتحدث الأنهيارات في عزل المنظومة خلال ارتفاع الفولتية الى الذروة الأولى عدا حالات بعض العوازل الصلبة والسائلة .

(ب) أزمنة مقدمة الموجة لبعض من الفولتيات المفرطة نتيجة الأقلدة (أنظر الفصل 2) والتي تسبب انتقال التمورات على طول خطوط النقل (أنظر الفصل 4) هي ذات رتبة 0·1 ms الى 1 ms . وفولتيات قفز الشرر للفجوات الهوائية الطويلة وللعوازل لها قيم أقل لمقدمات موجة بين حوالي 0·05 ms الى 0·3 ms خصوصاً لتمورات القطبية الموجبة . مايلاحظ على انهيار تمور الأقلدة الذي يحدث بصورة عامة قبل الذروة الأولى للعازل الغازي . أنه يجعل من الممكن تمثيل تحورات الأقلدة ذات الترددات طبيعية التي تكون رتبتها في حدود بضع مئات من الهيرتز بوساطة فولتيات دفعية احادية الأتجاه لها أزمنة

مقدمة موجه برتبة 1 ms . وتسليط الفولتيات الدفعية للأقلدة ذات أزمنة مقدمة موجه تتغير بين حوالي $10\ \mu s$ و $600\ \mu s$ على فجوات هوائية قضيب / قضيب طويلة وقضيب الى مستوي وعلى عوازل الدعامة والعوازل المعلقة (انظر الجزء 1 الفقرة 4.1) تبين أن فولتيات قفز الشرر الدنيا ستكون عند أزمنة ذات رتبة 1 ms . وشكل 5.3 يبين نوع المنحنى الذي سنحصل عليه في حالتنا هذه لسلسلة ذات 15 عازلاً معلقاً ويبين تأثير القطبية الملحوظة النموذجية . التي سيكون هناك وفقاً لها تقليص في القوة فيما يخص التمورات الموجبة اعظم منه للتمورات السالبة .



شكل 5.3 فولتية قفز الشرر دالة لزمن قفز الشرر ا 15 عازل معلق جاف نوع كرة وماخذ .

ولفجوات هوائية أطول من حوالي مترين ولزمن قفز شرر بين حوالي $50\ \mu s$ و $300\ \mu s$ تكون فولتية قفز الشرر الدنيا بصورة عامة أقل من ذروة فولتية تردد القدرة التي يحدث عندها الأنهيار . وهذا يكون صحيحاً أيضا فيما يخص سلاسل العوازل المعلقة الأطول من مترين عند تسليط تمورات نوع الأقلدة الموجبة والسالبة عندما تكون العوازل جافة بينما عندما تكون العوازل رطبة فان ذلك سيكون صحيحاً فيما يخص القطبية الموجبة فقط . أما فيما يخص عوازل الدعامة فان ذلك سينطبق عندما تكون هذه العوازل جافة ولقطبية موجبة فقط . ويجب أن يكون حيز الخلوص في منظومات الـ E.H.V. بصورة عامة اكبر مما ينبغي ان يكون عليه فيما يخص موجات 1/50 الـكي يعطينا تنسيق عزل مع

تمورات الأقلدة . واذا أستعملنا لهذا السبب وحدات أكثر في سلسلة عازل معلقة عمودية لخط نقل مما قدنحتاجه لموجات صاعقة فعند ذلك قد تصل موجات صاعقة سالبة الى معدات المحطة الثانوية لأن هذه الموجات لاتسبب شرراً عرضياً لعوازل الخط . واذا ارتفعت فولتيات نقل المنظومة مع الزمن الى أبعد من 1000 kV فمن الممكن أن نصل الى حد قد يكون عند حوالي 1500 kV . نتيجة للتقليص في القوة للفجوات الطويلة جداً عند مقدمة موجات تمورات الأقلدة .

متانات الأجزاء المختلفة لعازل المحول تحت ظروف تمور الأقلدة يمكن أن تكون واطئة نسبياً وتكون حوالي 80٪ من متانتها تحت ظروف موجة الـ 1/50 ويمكن أن يحدث تقليل مشابه في القابلوات المملوءة بالزيت التي لها دفعيات أقلدة متذبذبة والتي تستغرق عدة دورات لكي تتناقص الى نصف القيمة الأبتدائية . واذا كان من الممكن تحديد تمورات الأقلدة لكي تكون بحدود 2.3 p.u. فسوف لايكون العزل ضرورياً لأكثر من ذلك الذي نحتاجه للصمد ضد تردد القدرة والفحوص الدفعية 1/50 .

بسبب الصعوبات التي تمت مناقشتها قبل قليل من المحتمل ان ترتفع فولتيات المنظومة الى أكثر من حوالي 700 kV عند ذلك يكون من الضروري استعمال طرق جديدة للسيطرة على الفولتيات المفرطة للأقلدة . وهذه يمكن أن تتضمن مايلي :

(أ) استعمال مقاومات او ملفات مفاعلة او وسائط اخرى لتعريف شحنات الخط المحصورة بعد الفتح (انظر الفقرات 2.10 و 2.11) .

(ب) ربط مقاومات على التوالي في الدائرة ذات قيم مسيطر عليها بدقة عند غلق قاطع الدورة ويتم قصر دائرة المقاومة بعد ذلك بوساطة مفتاح آخر (أنظر الفقرة 2.12)

(ج) التأكد من ان الاقطاب الثلاثة للقاطع الذي سيغلق عند خط ينتهي بمحول ستغلق خلال حوالي دورة (انظر الفقرة 2.12) .

(د) عند غلق القاطع لخط لاينتهي بمحول يجب التأكد من ان الزمن بين غلق القطب الأول والثاني . والثاني والثالث يتجاوز ضعف الزمن العابر للخط .

(هـ) استعمال سيطرة الكترونية لتشغيل قاطع الدورة بحيث ان الظروف الأكثر خطورة ستعطينا فولتيات مفرطة ذات قطبية سالبة وليست موجبة . لأن فولتية قفز الشرر السالبة للعازل الجاف على الاقل تكون بصورة عامة أعلى بقيمة ملحوظة وأكثر توافقا من تلك التي لتمورات القطبية الموجبة .

5.5 مستويات العزل للخطوط العلوية المعلقة

Insulation levels for overhead lines

تُحمل أغلب الخطوط العلوية المعلقة على أبراج فولاذية مربوطة الى الأرض لكي تجعل مقاومة قاعدة البرج منخفضة الى أقل مايمكن كما وتحمل الابراج سلكاً أرضياً اوسلكين يسيران فوق بقية الاسلاك. وتوجد أقطاب عند اي من نهايتي سلاسل العوازل بحيث ان الشرر العرضي يحدث من خلالها عند الفولتيات المفرطة وهذا يكون أفضل من شرر عرضي من الموصل الحي الى الأرضي الذي قد يسبب تلف الموصل. هذه الأقطاب يجب ان تمنع كذلك تلف ظلل العوازل عند سريان قدرة خلال قوس شرارة بعد انهيار الفجوة اوبعد حدوث شرر عرضي عبر سطح العازل الملوث. وفي بعض الحالات عند فولتيات واطئة نسبياً والتي لايمكن الحصول على مقاومة ارضي واطئة فيها تستعمل أعمدة وأذرع مستعرضة خشبية وبذلك يمكننا التخلص من استعمال ملحقات التأريض المعدنيــة ومن ضمنها الاسلاك الارضية. ومستوى العزل للخط سيزداد عنـد ذلـك بحوالي 15 kV/m للخشب حتـى اذا كـان رطباً ولـكن معـدات المحطـة الثانويـة ستتعرض الى تمورات اكثر قساوة مما قد يجعل من الضروري نصب مغيرات اتجاه تمور. ان الاعمدة ذات الهيكل الخشبي الـكامل لاتستعمل الا نادراً في بريطانيا (عـدا عند 11 kV) وقمة العمود ذات الهيكل المعدني تربط الى الأرض عادة. وهذا سيعطي فولتية شرر عرضي أقل ولكن سيعطي حماية أكثر ضد التسرب.

العزل الذي نحتاجه على الخطوط العلوية المعلقة ذات 400 kV اوأعلى للصمد ضد تمـورات الأقلدة يكون بشكل بحيث ان عدداً قليلاً من الشرر العرضي نتيجة للصواعق يمكن ان يحدث. لأن حيز الخلوص الذي نحتاجه بصورة عامة يكون اكبر من ذلك الذي نحتاجه للصمد ضد موجات 1/50 القياسية أو تمورات الصواعق. أما فيما يخص الخطوط ذات 275 kV او أقل فلايكون اقتصادياً عزل الخطوط العلوية المعلقة بحيث انها يمكن ان تصمد ضد الفولتيات المفرطة لصواعق اكثر من تلك

المعتدلة القساوة. ولكنها يجب ان تصمد ضد كل الفولتيات المفرطة الداخلية حتى تحت ظروف المطر والتلوث الجوي والضباب. لذلك فان الهدف الرئيسي في تصميم عوازل الخطوط العلوية المعلقة (والمحطات الثانوية المنصوبة في العراء) هو تقليل

التأثيرات المضرة للجو والتلوث الصناعي او التلوث بالملح على فولتيات الشرر العرضي عند تردد القدرة . والفولتيات المفرطة الناشئة من قبل ظروف قطع تيار شحن السعة (الفقرة 2.10) وتقطيع تيارات التمغنط للمحول او للملف المفاعل المتوازي (الفقرة 2.9) من النادر جداً أن تتجاوز أربعة أضعاف ذروة فولتية الطور وفي أغلب الحالات لاتتجاوز النسبة 3 p.u. في المنظومات ذات المحايد المؤرض . وتأريض المحايد المؤثر يستعمل لأعلى فولتيات النقل حتى في أوربا حيث تم تبني التأريض الرنان باستعمال ملف خامد للشرارة منذ مدة طويلة . ولاتطبق هذه الطريقة على فولتيات أكثر من 220 kV . بينما يتم استعمالها لفولتيات أخفض من ذلك فقط في بريطانيا . ان المتطلبات المعتادة بالنسبة لعوازل الخطوط العلوية المعلقة هو ان تصمد ضد ثلاثة أو أربعة أضعاف فولتية الطور الاسمية عندما تكون رطبة . وأنه يجب ان يكون لها مسار متعرج يعتمد طوله على كمية التلوث في تلك المنطقة . وفي بعض الأماكن التي يمكن فيها أن تهمل قيمة التلوث مقارنة مع الصاعقة . يمكن أن تخفف متطلبات تردد القدرة نوعاً ما بشرط ان يكون المستوى الدفعي مناسباً . ملحقات قوس الشرارة على العازل وان كانت تقلل من فولتية الصمد الدفعية له الا انها لاتزال بصورة عامة اكبر من الفحص الدفعي المطلوب لمستوى العزل الاساسي (B.I.L.) للمنظومة بسبب متطلبات فولتية صمد تردد القدرة . وستكون هناك حماية بخط ارضي على طول مسافة 1.5كم لخط يؤدي الى محطة ثانوية (حتى انه لولم يكن موجوداً في بقية اجزاء الخط) واذا كان للمحطة الثانوية فجوات قضيب بدلا من مغيرات اتجاه التمور فأن عزل هذا الجزء من الخط سيكون مساوياً تقريبا عى مستوى (B.I.L.) فقط وذلك لكي يمكن السيطرة على اتساع التمورات الواصلة الى المحطة ويمنع الاشتغال غير الضروري بفجوات القضيب الخاصة بها . بقية عازل المنظومة قد تكون له متانة تزيد عن الـ B.I.L. اعتماداً على العديد من العوامل مثل مستوى الايسوسيرونك العالي والمقاومات العالية لقواعد الأبراج. وفي الخطوط التي يكون فيها الافلات نتيجة مثلا لتيار القدرة – اللاحقة – المارة بعد شرر عرضي خلفي قد يسبب انقطاع التجهيز. فانه يجب استعمال معدات أقلدة اعادة غلق ذاتي ذي سرعة عالية او ملف باترسون .

5.6 حماية المعدات في المحطات الثانوية ذات الفولتية العالية المنصوبة في العراء

Protection of equipment in high-voltage outdoor sub- stations

يمكن ان نقوم بحماية المعدات في المحطات الثانوية ذات الفولتية العالية المنصوبة في العراء كالمحولات وقواطع الدورة ومقاليد الفصل والعوازل المعلقة والساندة وقضبان التوزيع . بوسائط مثل الفجوات الهوائية وفجوات الطرد (الانابيب المحمية) ومغيرات اتجاه التمور والاسلاك الأرضية المعلقة . ويمكن تقليل خطر ضربات الصواعق على الخط بالقرب من المحطات الثانوية عن طريق تهيئة سلك أرضي ثانٍ ولمسافة حوالي 1·5 كم . أو في بعض الأحوال بتقليل التمورات الداخلة على الخط عن طريق انهاء الخط عند مسافة 0·8 الى 1·5 كم من المحطة الثانوية . وربطه بالمحطة بقابلو (انظر الفقرة 4.4.2) . وتوجد هناك أجهزة تعرف بأنها مصفيات او ممتصات التمور تقوم بتقليل اتساع التمور أو شدة الانحدار او كليهما لمقدمة موجته ولكنها ليست واسعة الاستعمال . أما اذا تم انهاء خطوط عددها n عند محطة ثانوية فعند ذلك اذا كانت $n > 2$ فان هناك تقليلاً في اتساع التمور عندما يصل تمور V على طول خط واحد لأن الفولتية ستزداد الى $2V/n$ (انظر الفقرة 4.4.2) .

قد تكون الفجوة الهوائية بين أقطاب ذات أشكال مختلفة مثل قضبان أو حلقات يتم تركيبها بوصفها قرون قوس شرارة على العوازل والأغلفة . أو قد تكون فجوات قضبان تناسق منفصلة على محولات أو بقربها . وفولتية شرر عرضي لفجوات قضيب / قضيب (ينص عليها بصورة عامة على أنها 50% من القيمة الاحتمالية مع قيم 100% و 0% تختلف بحوالي ± 15%) تتناسب مع مسافة الفجوة لقدرة تقارب 0·9 واذا كانت الفجوة عمودية فانها ترتفع الى حوالي 30% أكثر لتمور سالب منها الى تمور موجب ان الفجوات المنسقة ومغيرات اتجاه التمور يمكن ان تعالج الفولتيات المفرطة لتمورات الاقلدة اضافة الى تلك الناتجة عن الصاعقة . واذا استعملنا فجوات قضيب / قضيب لحماية حيز خلوص يمكن في الاغلب ان يقارب مستوى / قضيب . فعندئذ تكون القاعدة للتنسيق المقنع هي احتمالية 90% لفولتية شرر عرضي من السابقة تساوي فولتية شرر عرضي 10% من الاخيرة . فجوات الطرد (أو الانابيب المحمّية) التي تستعمل للحماية من الصواعق لها اسطوانة عزل ذات نهاية مفتوحة واحدة محيطه بالفجوة الهوائية بحيث ان تيار القدرة – اللاحقة – المارة بعد شرر عرضي سينشيء ضغطاً غازياً يمكن

الفجوة ضمن مدى تيارمعين من أن تطفأ ذاتيا. وهذا على أنه سيتغلب على واحده من مساويء الفجوة الهوائية . وهي ان تيار القدرة بعد الشرر العرضي سيحتاج الى فصل قاطع دورة لفصحه . الا ان فجوة الطرد لها تطبيقات محدودة . ولفجوة القضيب

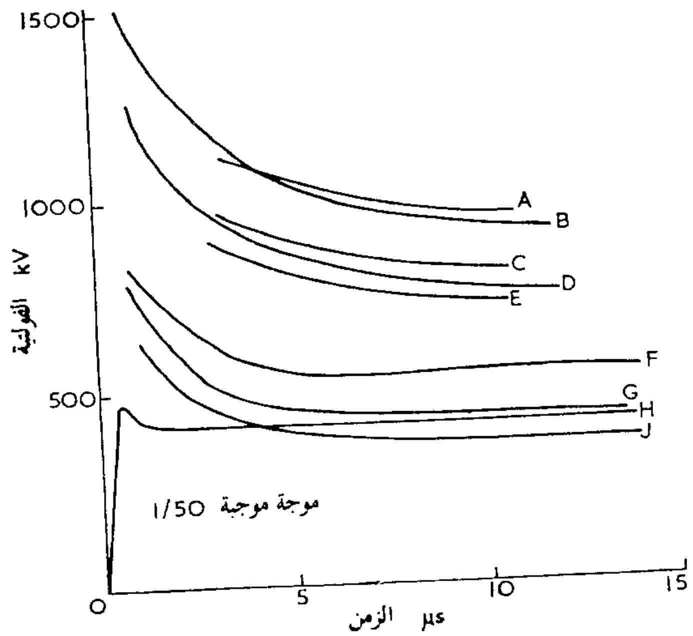
مساويء اضافية بجانب كونها تحتاج الى قاطع دورة لأزالة قوس شرارة تردد القدرة ، وهي أن لها تأخيراً زمنياً طويلاً نسبياً بالقياس الى الفولتية الدفعية ذات الفترة القصيرة بحيث أنه اذا كان قد تم تنظيم طولها لتهيئة حماية للاجهزة عند أزمنه طويلة فانها قد لاتوفر حماية عند أزمنة قصيرة . من ناحية ثانية اذا كان قد تم تنظيم فجوتها لتوفير حماية عند أزمنة قصيرة فان فولتية الشرر العرضي الدنيا لها قد تكون واطئة جداً . وبذلك يمكن أن تسبب اشتغالاً غير مرغوب فيه لتمورات ثانوية . لذلك فان التنظيم الفعلي المتبنى يجب ان يوفق بين ذلك كله . وفجوات القضبان المنسقة يجب أن تنظم لكي يكون لها فولتية شررعرضي دفعية 50% ذات حوالي 80% الى 85% من مستوى الصمد الدفعي للمحول . وضرر احتياج تيار قدرة الفجوة الهوائية الى ازالة بوساطة قاطع دورة يمكن التغلب عليه اذا كان الأخير ذا قابلية اعادة غلق ذاتية ضمن عدد من عشرات الدورات . بحيث أن التجهيز سوف لاينقطع فعلياً في معظم الحالات لأن مسار العطل ثم ايقاف تاينه في هذه الفترة الزمنية . من ناحية ثانية اذا كان العطل دائمياً بدلاً من ان يكون عابراً . فان تيار العطل سيجري مرةً أخرى عند اعادة الغلق الذاتي للقاطع وبعد عدد مقرر مسبقا من اعادات الغلق سيبقى القاطع مفتوحاً . تكون كلفة مغيرات اتجاه التمور اعلى من الفجوات الهوائية ولكن نصبها لحماية معدات معينة يمكن تبريره في بعض الأحيان . حتى في بريطانيا حيث يكون مستوى الايسوسيرونك واطئاًنسبياً . وحيث تكون اغلب الخطوط محمية بأسلاك أرضية وحيث تكون أغلب مقاومات قواعد الأبراج واطئة وبوجود دوائر مزدوجة . فمثلاً يمكن نصبها عند محول مولد او عند محول يقع عند نهاية خط مغلق ذي عمود خشبي ليس له أسلاك أرضية .

ويتألف مغير اتجاه التمور بصورة أساسية من حزمة من مقاومات لاخطية على االتوالي مع عدد من فجوات الشرارة مسدودة بأحكام في غلاف معزول مع ظلل مشابهة لتلك التي للأغلفة المعدنية . يمكن أن يربط على التوازي مع الفجوات الهوائية مقاومات لاخطية ذات ممانعات عالية تحمل تياراً يقاربـ1 mA عند فولتية الدائرة الاعتيادية لكي تعطي توزيع فولتية منتظما بين الفجوات . ويجب أن لاتكون الفجوات الهوائية فقط . عديمة الشرر العرضي تحت فولتية الطور (خط الى الأرضي) الذروة عند تردد المنظومة . ولكن اذا حدث عطل أرضي على طور واحد . فيجب أن لايكون

هناك شرر عرضي فيها عندما تصل الفولتية الى الأرضي على الطورين الأخرين الى فولتية الخط في منظومة ليست مؤرضة بصورة مؤثرة . أو تصل الى 80% من فولتية الخط في منظومة مؤرضة بصورة فعالة . وهكذا فمثلاً يمكن استعمال مغير اتجاه التمور لمقنن فولتية (ج . م . ت) 245 kV في منظومة غير مؤرضة بصورة مؤثرة لها فولتية خط تبلغ 245 kV ، ولكن في منظومة مؤرضة مباشرة يمكن ان يستعمل الى حد فولتية خط 300 kV .

فولتية قفز الشرر الدفعية لفجوات مغير الأتجاه غالباً ماتكون بين ضعفين الى ثلاثة اضعاف مقنن الفولتية (ج . م . ت) . وعند حدوث الشرر العرضي في الفجوات فان الفولتية العالية عبر المقاومات اللاخطية المتوالية الرئيسية تسبب هبوط مقاومتها الى قيمة واطئة جداً . بحيث أنه يتم تفريغ تيار عال الى الأرض . مع بقاء الفولتية عبر الاتجاه ثابتة تقريباً خلال زمن التفريغ هذا ، عند قيمة أعلى أو أخفض بقليل من فولتية قفز الشرر (انظر شكل 5.4) . هذه الفولتية التي يمكن عدها ثابتة تعرف بالفولتية المتبقية أو فولتية التفريغ ويمكن أن تقتبس لشكل موجة تيار مثل موجة 8/20 μs ذات 5 أو 10 kA والتي تناظر تقريباً شكل موجة لتيار جار خلال مقاومات لاخطية عند تسليط موجة فولتية 1/50 μs الى مغير الأتجاه . من جهة اخرى ، ليس صحيحاً بالضرورة أن لاتتعدى فولتية مغير الاتجاه قيمة التفريغ لكل ظروف تمورات الأقلدة . قوس شرارة تيار القدرة – اللاحقة – المارة الذي سيتبع تفريغ تيار الصاعقة يمكن أن يقصم بوساطة الفجوات الهوائية (بأستعمال وسائل مثل المغناطيسية اذا كان ذلك ضرورياً) . وهذا سيسهل أكثر بالزيادة الكبيرة في المقاومة لحزمة المقاومات اللاخطية التي ستقلل التيار عندما تهبط الفولتية الى فولتية منظومة تردد القدرة الواطئة نسبياً . ولتمورات الأقلدة طاقات يمكن ان تكون بين 10 أضعاف الى 50 ضعفا لطاقة موجة صاعقة نموذجية وعلى مغير الاتجاه ان يكون قادراً على امتصاص هذه الطاقة من دون ان يتلف . وقد يحدث الشرر العرضي لمغيرات الاتجاه في تمور الأقلدة عند حوالي 80% من فولتية الشرر العرضي ذات 1/50

عندما تنقل موجة تحور منتقلة على طول خط الى محطة ثانوية حيث سيكون هناك مغير اتجاه تمور والذي سيسبب شرراً عرضيا . فأن تمور فولتية سالبا سينعكس راجعا على طول الخط نتيجة لكون فولتية تفريغ مغير الاتجاه أقل من فولتية التمور القادمة . والتمور المقلل المساوي لفولتية التفريغ سيستمر موجة متقدمة . واذا وصلت الى المحول فعندئذ ستحدث انعكاسات موجبة (انظر الفصل 4) . وبذلك فان الفولتية



شكل 5.4 تنسيق العزل لمحطة ثانوية 132-kV

A. – عوازل شد وعوازل معلقة . 12 وحدة
B. – عوازل دعامة . 5 وحدات
C. – عوازل شد وعوازل معلقة . 10 وحدات
D. – عوازل دعامة . 4 وحدات
E. – عوازل شد وعوازل معلقة . 9 وحدات
F. – المستوى الدفعي لصمد المحولة
G. – فجوة قضيب . 66 سم
H – مغير اتجاه تمور . 116-kV
J. – فجوة قضيب . 56 سم

الى الأرض عبر طور المحول ستتجاوز فولتية تفريغ مغير الاتجاه لضعف الزمن المستغرق للتمور لـكـي ينتقل بين مغير الاتجاه والمحول . بما أن الفولتية المتزايدة . وكما يشير شكل 5.4 . يجب أن لاتكون موجودة عبر المحول حتـى لحد 1 µs لـكـي تعطينا حماية مناسبة . والتمور على خط معلق علوي ينتقل بحدود 300 m/µs . فان مغيرات التمور الثلاثة (واحد لـكل طور) يجب أن توضع على بعد لايتجاوز أمتاراً قليلة من المحول الذي تقوم بحمايته . ولـكـي نأخذ فـي الحسبان هبوط الفولتية في ربـط الأرضـي والتبدد نتيجة لسماحات التصنيع ولتغيرات شكل الموجة فان منسوب الحماية غالباً مايؤخذ على أنه 30 kV+ (الفولتية الاستبقائية ×1.15) .

اذ اشتغل مغير اتجاه تمور ، ربما نتيجة لضربة صاعقة ، عند زمن تكون فيه فولتية تردد القدرة فوق قيمتها الاعتيادية فقد لا يتمكن من ازالة تيار القدرة – اللاحقة – المارة وكذلك فانه من المحتمل اعادة – أشعال قاطع الدورة وتكون الاحمال السعية سبباً شائعاً لارتفاع فولتية تردد – القدرة وهذا الارتفاع تحت ظروف الأضطراب سيعتمد على نسبة ميكافولت أمبير الدائرة القصيرة الى ميكافار الحمل السعيّ نتيجة لسعة التتابع الصفري للخطوط غير المحملة والقابلوات بصورة خاصة . وكلما أزدادت فولتيات الـ E.H.V. ارتفاعاً تتجه هذه النسبة نحو الأضمحلال وفولتية تردد القدرة يمكن أن تزداد في بعض الاحيان نتيجة لذلك . فضلاً عن التأثيرات أعلاه فان هذه ستزيد تمورات الأقلدة .

شكل 5.4 يوضح مثالاً لتنسيق العزل في محطة ثانوية 132-kV في العراء وهذا الشكل يعتمد على خواص الفولتية / الزمن للأجهزة ولموجات ذات قطبية موجبه . وبما أن المنظومة المقصورة مؤرضة بصورة مؤثرة فان العزل المقلل لمستوى الصمد الدفعي للفولتية 550-kV يمكن أن يستعمل للمحولات بدلاً من 650-kV (جدول 5.2) مع توفير ملحوظ في الكلفة . واذا أبقينا مستوى الفولتية 650-kV بدلاً من 550-kV لمعدات الأقلدة (جدول 5.1) ولقضبان التوزيع فان الكلفة الأضافية ستكون قليلة نسبياً ، وستقل احتمالية اخفاق المعدات المشتركة لعدد من الدوائر . من المهم التنسيق بين عزل الفجوة المفتوحة لمعدات الاقلدة والعزل الى الارض بسبب الخطر المحتمل للاشخاص اذا حدث شرر عرضي ربما نتيجة لتمور الأقلدة من قاطع دورة آخر . وهذا مثل ظواهر التنسيق الأخرى . قد تمت دراسته احصائياً .

مغيرات الاتجاه ذات التقنين المقلل (116 أو 121-kV) . وتدعى احيانا مغيرات اتجاه 80٪ . يمكن أن تستعمل لحماية محول بشرط أن تكون ضمن بعد حوالي 20 متراً من المحول أو يمكن أستعمال مجموعة فجوات قضبان ذات 56 سم أو 66 سم . الأختيار بين هاتين الفجوتين يعتمد على الخبرة الهندسية . آخذين بنظر الاعتبار العوامل الأخرى مثل الشرر العرضي الأضافي في حالة تمورات الأقلدة عند الفجوة المنخفضة واحتمالية سقوط الصاعقة في المنطقة لذلك ففي بريطانيا العظمى غالبا ما تستعمل الفجوة ذات 66 سم . ويمكننا أن نرى أن هذه قد لا تحمي المحول ضد الموجات الشديدة الأنحدار ولكن مثل هذه الموجات نادر جداً عند حماية الخطوط العلوية المعلقة بأسلاك أرضية .

ان عازل الدعامة ذو الوحدات الأربع من النوع ذي الخاصية D يفي بمتطلبات مستوى الصمود الدفعي للفولتية 650-kV . وعندما يكون تلوث الجو اعتياديا فان مسافة تدرج الى الأرضي ذات حوالي 1·7 cm/kV (أي 224 cm للفولتية 132 kV) تكون مناسبة . والعازل الدعامة ذو الوحدات الاربع مع طول تدرج يبلغ 302 سم 216 سم منها محمية . سيكون مناسباً . في منطقة يكون فيها التلوث كثيفاً وتشير الخبرة الى الحاجة الى مسافة تدرج تقارب 2·5 cm/kV فيمكننا أستعمال العازل الدعامة ذي الوحدات الخمس والمبين في المنحني B . وبالتشابه فان سلسلة الوحدات التسعة ذات عوازل الشد والتعليق ذات الغطاء والمسمار تفي بمتطلبات الفولتية الدفعية ولكن الوحدات العشر التي لها طول تدرج كلي 310 سم ، 208 منها محمية ، ولكن الوحدات العشر التي لها طول كلي 310 سم 208 سم منها محمية ، يمكن أن تستعمل للسلاسل المعلقة . ويمكننا أستعمال 12 وحدة لسلسلة الشد لأنها تكون أفقية تقريباً بحيث أن فولتية الشرر العرضي لها ستنخفض الى أقل من تلك التي لسلسلة العازل الشاقولية (عندما تبقى الجوانب التحتانية للعوازل جافة) بسبب المطر وتأثيره على تلوث السطح . والقليل من فولتية الشرر العرضي نتيجة للمطر الاصطناعي فيما يخص فحص فولتية تردد القدرة يكون بصورة عامة أكبر منه الى الفولتية الدفعية .

5.7 تنسيق العزل في منظومات الفولتية العالية للتيار المستمر

Insulation co-ordination in h.v.d.c. systems

يمكن تعريض منظومات الـ H.V.D.C. بصورة عامة الى فولتيات مفرطة خارجية وداخلية مشابهة لمنظومات الـ a.c. ولكن اضافة الى ذلك ستنشأ فولتيات مفرطة داخلية دورية نتيجة للتبديل . وقد تنشأ الفولتيات المفرطة العابرة بسبب اخفاق في التبديل أو في دوائر السيطرة اوبوساطة دائرة قصيرة . فضلاً عن احتمال التقليل المحسوس في كلفة معدات المغير (جهاز تحويل الطاقة) عن طريق المحافظة على أقل مايمكن من العازل ، يكون تقليل الفولتيات المفرطة مقللاً فرص اعادة اشعال مغيرات القوس الزئبقي أو اخفاق الثايروستورات .

الطريقتان الرئيسيتان لتحديد الفولتيات المفرطة تكونان باستعمال الأخماد ومغيرات الأتجاه او بفجوات الشرارة . كلتا الفولتيتين المفرطتين الداخلية والخارجية يمكن ان يخمدا بوساطة واحدة من العديد من الدوائر المربوطة على التوازي مع أجهزة التحويل

وهذه تخدمنا كذلك في اعطاء توزيع فولتية منتظم اذا ربطنا عددا من وحدات اجهزة التحويل على التوالي . وفيما يخص مغيرات اتجاه التمور تكون الحاجة الى فولتية استبقائية منخفضة وفولتية قفز –شرر منخفضة وحجم تفريغ عالٍ وكبت ذاتي خصوصاً عندما لايكون هناك تيار طبيعي صفري . متضاربة فيما بينها الى حد ما . من جهة أخرى مكن استعمال القوى المغناطيسية لتحديد الشرارة والتبريد الكفء من تطوير مغيرات الأتجاه لمنظومات الـ h.v.d.c. . وهذه لاتكون سعتها الحرارية كافية دائماً لتحديد الفولتيات المفرطة لشبه الحالة المستقرة أو العابرة ذات الحاجة الى تبريد طاقة كبيرة مثل حالة تفريغ قابلو طويل . ولتلافي كل هذه المصاعب يمكن استعمال فجوات شرارة مفرغة أو هوائية في حالات خاصة بالترابط مع مغيرات الأتجاه رغم انها هي نفسها ليست كابتة ذاتياً .

مستويات الصمد للأجهزة يمكن ان تعتمد على مستويات الحماية لمغيرات اتجاه التمور (تعتمد على أعلى الأثنتين -فولتية قفز الشرر القصوى والفولتية الأستبقائية) . ومستويات تمور الأقلدة ، والتي ستكون أقل من تلك التي للفولتيات الدفعية ذات نوع 1/50 ، يمكن ان تكون منخفضة في بعض الأحوال الى مايقارب 1·1 مضروبة بمستوى حمايـة مغير الأتجاه .

المراجــــع :

CLIFF, J. S. 1954. The co-ordination of insulation of high-voltage electrical installations. *Proc. I.E.E.* **101,** Part 1, 39–56.

GOLDE, R. H. 1956. Lightning protection of tropical transmission systems. *Electrical Times*, 13 and 20 September.

HEISE, W. *et al.* 1968. Co-ordination of the insulation in H.V.D.C. systems. *E.T.Z.*, A, **89,** 204–208. (E.R.A. translation/IB2653).

HUGHES, R. C. & ROBERTS, W. J. 1965. Application of flashover characteristics of air gaps to insulation co-ordination. *Proc. I.E.E.*, **112,** No. 1, 198–202.

MORTLOCK, J. R. 1956. *A.C. Switchgear*: Volume 1. Chapman and Hall, London.

NEWMAN, S. E. & PARISH, A. R. 1953. Insulation co-ordination in high-voltage stations. *English Electric Journal,* **13,** No. 3.

OAKESHOTT, D. F. 1968. Lightning and switching surge protection. *Borough Polytechnic Course on System Protection.*

THOMAS, A. M. 1966. The switching surge strength of insulating arrangements for systems operating at voltages above 100 kV. *E.R.A. Report* No. 5080.

THOMAS, A. M. & OAKESHOTT, D. F. 1956. Choice of insulation and surge protection of overhead transmission lines of 33 kV and above. *E.R.A. Report* O/T 14.

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفَصلُ السَّادِسُ

منظومات التقويم ، والتقويم العكسي وفولتيات التيار المستمر العالية :

RECTIFICATION, INVERSION AND HIGH-VOLTAGE D.C. SYSTEMS

6.1 مقدمة :

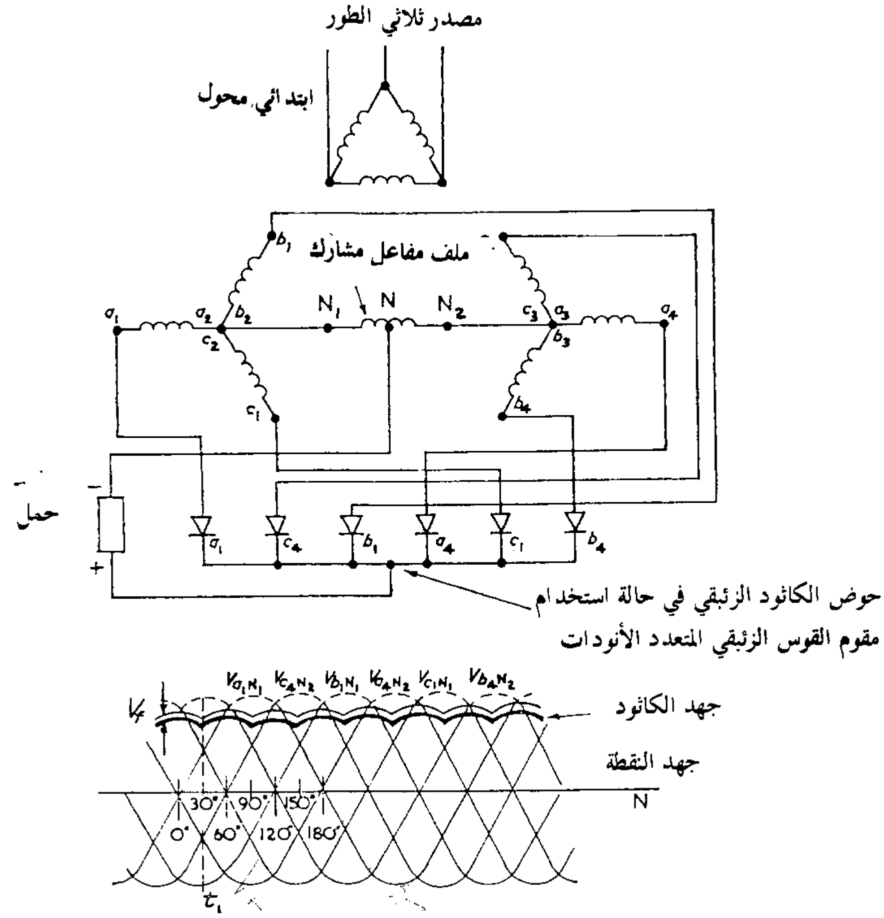
في هذا الفصل سيتم اعطاء مقدمة في المبادىء الاساسية ذات العلاقة بتحويل الطاقة energy Convevsion من تيارمتناوب الى تيارمستمروالتي تدعى ايضا التقويم . كذلك التحويل من تيارمستمر الى تيارمتناوب والتي تدعى بالتقويم العكسي . في اشتقاق العلاقات للفولتيات والتيارات المتناوبة المختلفة ، يجب التطرق الى دراسة ربط اجهزة الصمامات او انصاف الموصلات وكذلك ربط المحولات الرئيسية . وسنقوم هنا بوصف مجموعتين من الربط احداهما القنطرة الثلاثية الطوروتكمن اهميتها في مشاريع الفولتية المستمرة العالية H V D C. وفي اجهزة التحكم في سرع المكائن حيث يكون انسياب القدرة في كل منهما في اي اتجاه مطلوب . وفي منظومة القدرة نفسها فان اجهزة التحويل التي قد تعمل مقومات اومقومات عكسية ، يصادف وجودها بصورة رئيسية في مشاريع الفولتية المستمرة العالية وقد ادت اجهزة انصاف الموصلات التي ظهرت حديثا الى الايفاء بمتطلبات تحويل الطاقة بفولتية عالية وبتيار عال متجاوزة مشاكل الفولتية المفرطة فيها (راجع الفقرة 5.7) . لهذا السبب ستتم الاشارة هنا الى صمامات القوس الزئبقية بصورة مختصرة وبدون اعطاء اية تفاصيل عن تركيبها . لقد ذكر عدد من المراجع في نهاية هذا الفصل عن تطبيقات اجهزة التحويل في عمليات صناعية مشابهة مثل اجهزة التحكم في المكائن ، والتي تم فيها الاستعاضة الكلية عن صمامات القوس الزئبقية بالثايرستورات والثنائيات نصف الموصلة .

6.2 التقويم Rectification

من ضمن طرق الربط المختلفة التي قد تستخدم في اجهزة التحويل ، سيتم هنا مناقشة ربطين منها فقط .

6.2.1 الربط النجمي المزدوج DOUBLE-STAR CONNECTION

ان هذا الربط كان استخدامه معتادا في المقومات المستعملة في النطاق الصناعي . وكما يبين الشكل 6.1 . فان كلا من الملفات الثلاثية الطور لثانوي المحول الرئيسي تتكون في مجموعتين منفصلتين بحيث تشكل نظامين من ملفات مربوطة بشكل نجمي وتربط نقطتا التفرع النجمي سوية بوساطة ملف مفاعل يربط بين الاطوار (معادل طور) ذي وصلة مركزية . وتربط نهايات الاطوار الست كل منها الى انود واحد من الانودات الستة لصمام ذي ستة انودات او الى انودات ستة صمامات منفصلة او ثنائيات وكما موضح في الشكل . وتبين الخطوط المتقطعة جهود الانودات خلال التوصيل من حالة اللاحمل حتى تيار منتقل مقداره حوالي 1 الى 2% من تيار الحمل الكلي .لذلك فان كل انود او صمام يوصل (بغياب سيطرة الشبكة – راجع الفقرة 6.2.3) من اللحظة التي يزيد فيها جهد أنوده (بالنسبة الى النقطة N والتي تكون ظاهرياً عند الجهد نفسه لنقطتي N_1 و N_2) على جهد الأنود الذي كان سابقاً في حالة توصيل قبل هذه اللحظة ، والى اللحظة التي يهبط عندها جهده الى قيمة دون جهد الأنود المجاور وهذا التبديل الطبيعي للقوس من أنود أو صمام الى آخر محاور وعندما لاتكون هناك سيطرة شبكة او عندما تكون زاوية التأخير للشبكة صفراً (الفقرة 6.2.3). يعطي لهذه التيارات الواطئة جداً توصيلاً الى كل آنود ولزاوية مقدارها $60°$. وهذا هو أشتغال سداسي الطور . أي أن الأنود c_4 يوصل من $120°$ الى $180°$ في حين تعطي منظومة بثلاث أنودات توصيلاً قدره $120°$ لكل انود او صمام. ان التبديل من a_1 الى c_4 الى b_1 ... الخ يتسبب في أن يغير التيار في الملف المفاعل المعادل الطور اتجاهه بما يساوي ثلاثة أمثال تردد المصدر . وعلاوة على التيار المنتقل ، تحتث ق. د. ك كافية في الملف المفاعل وذلك لتمكن التيار في a_1 من أن يبدأ مبكراً وليكون مطاولاً الى أن يوصل b_1 وهلم جرا . يبدأ c_4 الآن بالتوصيل من $90°$ الى $210°$. وفي الفترة من $90°$ الى $150°$ يقوم c_4 بالتوصيل على التوازي مع a_1 ، ومن $150°$ الى $210°$ يقوم c_4 و b_1 بالتوصيل على التوازي . أما الفرق بين فولتيات خرج الثانوي للمحول فيظهر عبر الملف المفاعل المعادل الطور . وتكون الفولتية المستمرة الخارجة هي متوسط الأرتفاع للمساحة المحصورة بين جهد النقطة N والمنحنى الكامل لجهد



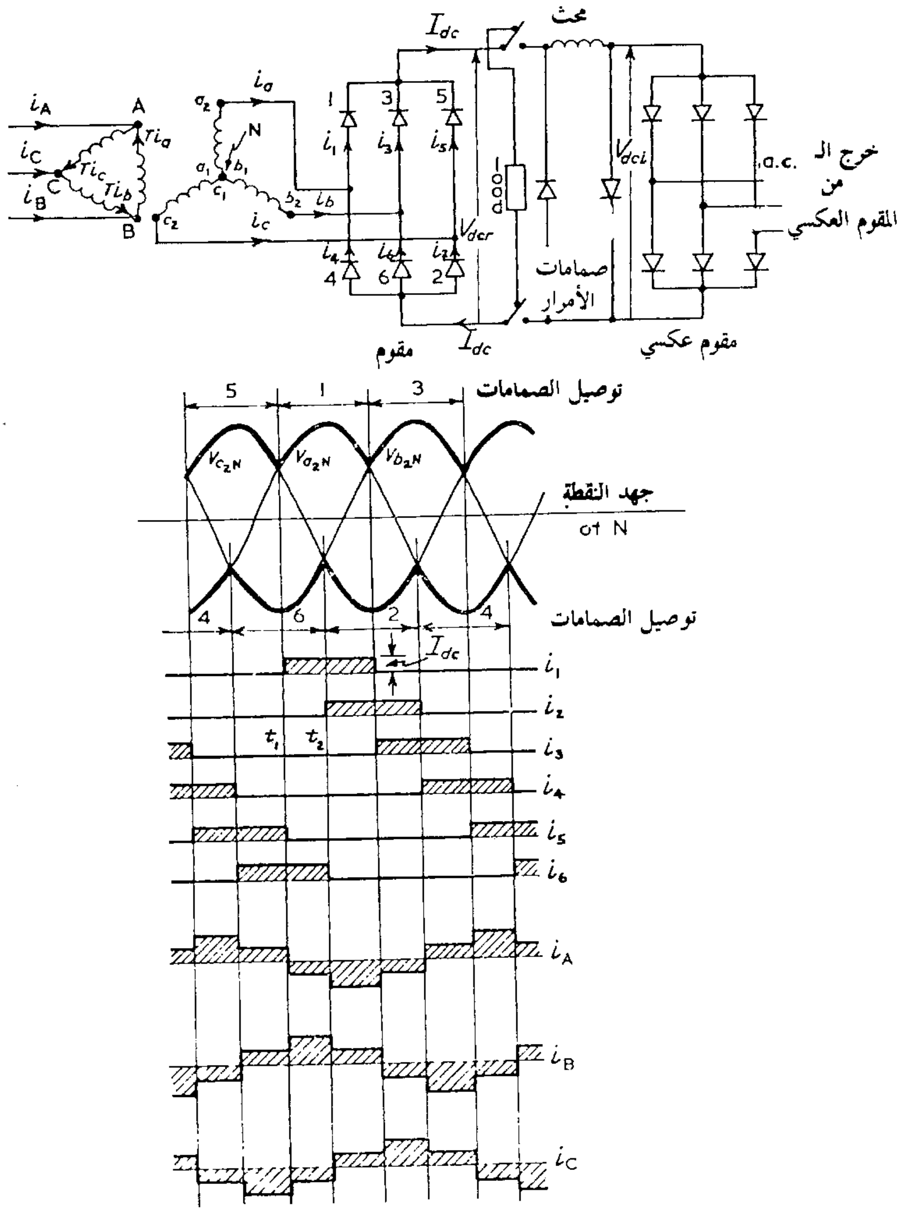
الشكل 6.1. ربط نجمي مزدوج وصيغة موجات الفولتية .

الكاثود . والأخير هو متوسط فولتيات الثانوي للأنودين اللذين يوصلان في اللحظة نفسها . مطروحاً منه هبوط الفولتية الأمامي V_f. على هذا الأساس تكون هناك مجموعتين من المقومات الثلاثية الطور تعمل على التوازي . وكل أنود يحمل نصف مقدار تيار الخرج المستمر لفترة 120° . ومحاسن هذا الربط هي قلة التموجات في فولتية الخرج عن الحالة فيما اذا أستخدمت ثلاثة انودات فقط . كذلك يكون عامل الأستخدام أعلى (الفقرة 6.2.4) من ذلك الذي في الربط القنطري السداسي الطور (ربط N_1 و N_2 مباشرة) .

6.2.2 الربط القنطري الثلاثي الطور 3-PHASE BRIDGE CONNECTION

يوضح الشكل 6.2 انه في هذا الربط الذي يستعمل في أجهزة تحويل الفولتية المستمرة العالية . يتم ربط كل طرف من أطراف ثانوي محول ثلاثي الطور الى انود احد الصمامات وكاثود صمام آخر . ويستطيع التيار من المرور الى كل طور ثانوي أو منه خلال الـ $120°$ الوسطية (التبديل طبيعي) لكل نصف دورة موجبة او سالبة . وفي أية لحظة فان التيار يمر خلال صمامين مربوطين على التوالي ، اي انه خلال فترة الزمن t_1 الى t_2 يكون التيار خارجاً من الطور a خلال الصمام 1 ويعود من الحمل الى الطور b. خلال الصمام 6 . وتتبع عملية التبديل من 6 الى 2 عند اللحظة t_2، خروج تيار من الطور a خلال الصمام 1 ورجوعه عن طريق الصمام 2 الى الطور c. وتكون فولتية الخرج المستمرة مساوية لمتوسط ارتفاع المساحة الواقعة بين المنحنيين الثقيلين الاثنين الذين يتباعدان بصورة متساوية حول جهد النقطة N.(هذا باهمال هبوط الفولتية الامامي في الصمامات) .

يوضح الشكل 6.2 تيارات الصمامات الستة i_1 الى i_6 بعد جعلها في حالة مثالية والتي يفرض كونها ثابتة عند قيمة I_{dc} بسبب المحاثة . كذلك يهمل التأخير في ارتفاع وانخفاض التيار حيث سيتم التعامل مع هذا الأمر في الفقرة القادمة . واذا كانت T تمثل النسبة لعدد لفات الطور الثانوي الى عدد لفات الطور الابتدائي على محول المقوم ، فعندئذ تكون تيارات الخط المأخوذة من المصدر a.c. هي $i_A = T(i_c - i_a)$ ، $i_B = T(i_a - i_b)$ وكذلك $i_C = T(i_b - i_c)$ ، ويمكن استخراج اشكال موجات هذه التيارات بتأمل كل فترة من الزمن التي يقوم خلالها صمامان مستقلان بالتوصيل . مثال على ذلك عندما يقوم الصمامان 4 و 5 بالتوصيل سوية $i_c = i_5$ وكذلك $i_a = -i_4$ بحيث ان $i_A = T(i_5 + i_4) = 2TI_{dc}$. وهلم جرا . ان صيغ موجات التيار الناتجة قد بينت في الشكل 6.2 وذلك باخذ T مساوياً لقيمة الوحدة ، حيث تبين هذه الموجات وجود تشويه توافقـي قاسٍ .



الشكل 6.2. ربط قنطري ثلاثي الطور وصيغة الموجات.

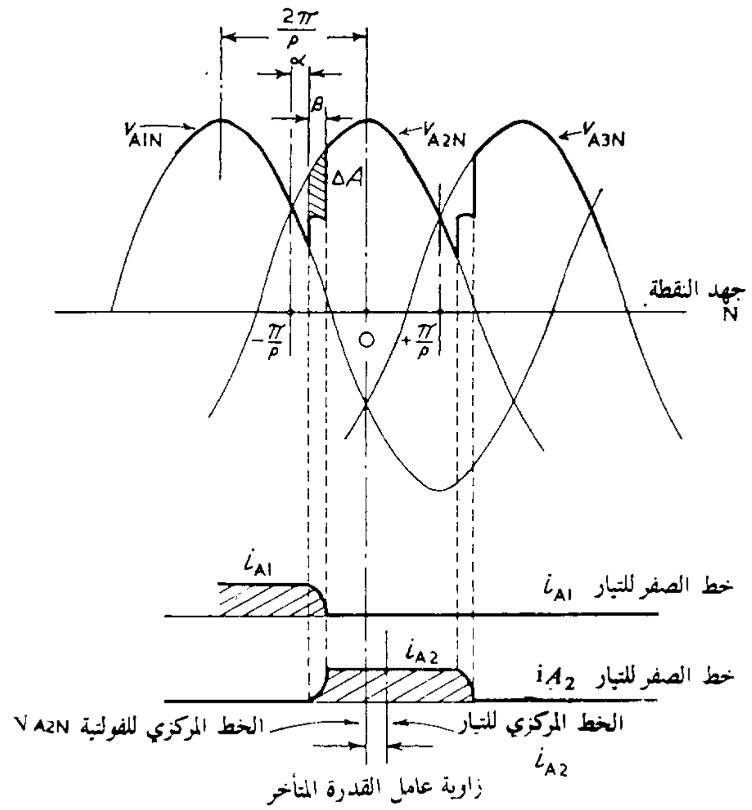
6.2.3 السيطرة الشبكية اوالبوابة وعملية التبديل
GRID OR GATE CONTROL AND COMMUTATION

لغرض السيطرة على فولتية خرج المقوم وكذلك لجعل جهازالتحويل يشتغل مقوماً عكسياً . فمن الاساسي وجوب السيطرة على لحظة التبديل نفسها بدلاً من تغيير مسار التوصيل الذي يحدث من صمام الى آخر مجاور عند نقطة التبديل الطبيعي وعندما تهبط فولتية انود الصمام الاول الى قيمة اقل من فولتية انود الصمام الثاني . وفي حالة الصمام ذي القوس الزئبقي الذي يحتوي على شبكة بين الكاثود والانود . لايمكن ان يحدث توصيل اذا كان للشبكة انحياز سالب بالنسبة الى الكاثود . لذا يكون توصيل الصمام 2 متأخراً الى مابعد نقطة التبديل الطبيعي بزاوية مساوية لزاوية تأخير الشبكة (انظر الشكل 6.3) حتى يتم تسليط فولتية موجبة بصورة مفاجئة على الشبكة نفسها . ان فولتية الشبكة ليست لها سيطرة على التوصيل حال ابتدائه ذلك لأنه سيكون هناك شحنات فراغية موجبة الأيون حول الشبكة . لهذا السبب فأن فولتية أشعال الشبكة تكون عبارة عن نبضة قصيرة ، لذا يمكن ان يتم ايقاف التيار بهبوط فولتية الانود الى الصفر فقط أو بوساطة التبديل الى الصمام المجاور عندما تتجاوز فولتية انوده فولتية انود الأول وتستلم الشبكة نبضة موجبة .وفي حالة الثايرستور تعمل نبضة تيار البوابة أو القدح المقدرة بالملي امبير والتي لها فترة زمنية قصيرة على نشوء التوصيل .وبسبب محاثة المحول التسربية ومحاثة منظومة التيار المتناوب فان هبوط التيار في الصمام 1 وارتفاعه في الصمام 2 يكونان متأخرين . لذا توجد فترة تداخل عابرة قصيرة تشغل زاوية مقدارها β° حيث يقوم صمامان بعملية التوصيل على التوازي خلالها (انظر الشكل 6.3) .على هذا الاساس فان صيغة موجة الفولتية الخارجة تكون عبارة عن متوسط قيمة فولتيتي الانود هاتين . وقد تسمى β بزاوية التداخل أو زاوية التبديل .

6.2.4 نسبة الفولتية ونسبة التيار VOLTAGE AND CURRENT RATIOS

لربط مقومات مثل النوع النجمي المزدوج حيث لا يوجد فيه صمام ثان يقوم بالتوصيل على التوالي . تكون الفولتية المستمرة الخارجة V_{dcr} في حالة اللاحمل أو قربها مساوية لمتوسط ارتفاع المساحة المحددة بالخط الافقي الذي يمثل جهد نقطة التفرع النجمي الثانية (أو نقطة انتصاف الملف المفاعل معادل الطور) وكذلك فولتية الانود الموصل (مطروحاً منها هبوط الفولتية V_f والذي يكون 15 الى 20 فولت للقوس الزئبقي . وحوالي 0.5 فولت للمقومات ذات انصاف الموصلات) . واذا تم اهمال التداخل

(حيث انه يكون صفراً في اللاحمل) فانه وكما مبين في الشكل 6.3 . يحدث التوصيل الى أي انود من $(-\pi/p+\alpha)°$ الى $(\pi/p+\alpha)°$. حيث أن p هي عدد الاطوار الفعالة في طريقة الربط (فمثلاً $p = 3$ للربط النجمي المزدوج فوق التيار المنتقل وتكون $p = 6$ تحت ذلك التيار) .



الشكل 6.3 تأثير تأخير الشبكة والتداخل على صيغ موجات المقوم .

$$V_{dcr} = \frac{p}{2\pi} \int_{(-\pi/p+\alpha)}^{(\pi/p+\alpha)} \sqrt{2}\, V_a \cos\theta \, d\theta - V_f \qquad [6.1]$$

حيث ان

V_a هي قيمة ج . م . ت لـ ق . د . ك المحتثة في طور واحد لثانوي المحول .

V_f هو هبوط الفولتية الأمامي في المقوم

$$\theta = \omega t = 2\pi f t$$

وبأخذ التكامل ينتج

$$V_{dcr} = \frac{\sqrt{2}p}{\pi} V_a \sin\frac{\pi}{p} \cos\alpha - V_f \qquad [6.2]$$

وتبين [6.2] ان اقصى قيمة لفولتية اللاحمل $\hat{V}_{dcr}$ للمقوم والتي تحدث في حالة التبديل الطبيعي . أي $\alpha = 0$ تعطي كالآتي

$$\hat{V}_{dcr} = \sqrt{2}\frac{p}{\pi} V_a \sin\frac{\pi}{p} - V_f \qquad [6.3]$$

وتسبب زاوية تأخير الشبكة α هبوطاً بالفولتية ويكون هبوطها مقترنا بالعامل $\cos\alpha$. ومما يجب ملاحظته في حالة المقوم ذي الربط القنطري الثلاثي الطور حيث هناك صمامان يقومان بالتوصيل على التوالي ان الفولتية المستمرة تعطى بمضاعفة قيمة ناتج المعادلة [6.2] مع جعل $p = 3$. وهذا يمكن توضيحه في الشكل 6.2 . وعند أخذ تداخل مقداره β في الحساب . وبالتمعن في الشكل 6.3 نستطيع كتابة الفولتية الخارجة كالآتي :

$$V_{dcr} = \sqrt{2}V_a \frac{p}{2\pi} [\tfrac{1}{2}\{ \int_{(-\pi/p+\alpha)}^{(-\pi/p+\alpha+\beta)} (\cos\theta + \cos(\theta + 2\pi/p))\, d\theta\}$$

$$+ \int_{(-\pi/p+\alpha+\beta)}^{(\pi/p+\alpha)} \cos\theta\, d\theta] - V_f \qquad [6.4]$$

وذلك لأنه من $(-\pi/p+\alpha)$ الى $(-\pi/p+\alpha+\beta)$ تكون الفولتية الخارجة متوسط قيمة فولتيات الأنودين الذين يوصلان سوية . وبمكاملة [6.4] وبفك حدودها ينتج

$$V_{dcr} = \frac{\sqrt{2}V_a p}{2\pi} \sin\frac{\pi}{p} [\cos\alpha + \cos(\alpha+\beta)] - V_f \qquad [6.5]$$

واذا تم أهمال هبوط الفولتية الأمامية فيمكن من [6.4] كتابة

$$V_{dcr} = \frac{\hat{V}_{dcr}}{2} [\cos\alpha + \cos(\alpha+\beta)] \qquad [6.6]$$

ولكي يتوضح التأثير الكمي للمحاثة L المحاثة التسربية لكل طور من المحول سوية مع محاثة دائرة المصدر. والتي تسبب حالة التداخل . فان [6.6] قد يتـم اشتقاقها بطريقة اخرى وكالآتي . عندما يوصل انودات او صمامان في اللحظة نفسها تحصل دائرة قصيرة عبر طورين من ملف الثانوي للمحول والتي بدورها تسبب مرور تيار i_s واذا كانت لحظة الصفر للزمن ($t = 0$) عند نقطة التبديل الطبيعي . فان الفولتية بين نهايتي الطورين ترتفع بصورة جيبية من قيمة الصفر الى قيمة ذروة فولتية الخط وهي $\sqrt{3}(\sqrt{2}V_a)$ للملف ثلاثي الطور ولكنها بصورة عامة تـكـون $2\sqrt{2}V_a \sin \pi/p$ للملف عدد اطواره p . واذا اهملت مقاومة ملفات المحول مقارنة بالمفاعلة التسربية $X = \omega L$ يكون

$$2L\, di_s/dt = 2\sqrt{2}V_a \sin (\pi/p) \sin \omega t$$

$$i_s = -\frac{\sqrt{2}V_a \sin (\pi/p) \cos \omega t}{\omega L} + K$$

ولما كانت $\omega t = \alpha$ حيث $i_s = 0$; لذا

$$K = \frac{\sqrt{2}V_a \sin (\pi/p) \cos \alpha}{\omega L}$$

وعندما تكون $\omega t = (\alpha + \beta)$, فان $i_s = I_{dc}$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{2}V_a \sin \pi/p}{X} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \beta)] \qquad [6.7]$$

أما هبوط الفولتية ΔV نتيجة التداخل فيعادل متوسط الأرتفاع على مدى زاوية مقدارها $2\pi/p$ للمساحة المظللة ΔA في الشكل 6.3, اي أن $\Delta V = \Delta A p/2\pi$ حيث ان

$$\Delta A = \tfrac{1}{2} \int_{\alpha}^{(\alpha+\beta)} 2\sqrt{2}V_a \sin (\pi/p) \sin \theta \, d\theta = \sqrt{2}V_a \sin \pi/p \times [\cos \alpha - \cos (\alpha + \beta)]$$

$$\Delta V = \frac{\sqrt{2}V_a p \sin \pi/p}{2\pi} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \beta)] \qquad [6.8]$$

وباهمال هبوط الفولتية الأمامي يكون متوسط الفولتية الخارجة نتيجة لزاوية تأخير α وزاوية تداخل β هو

$$V_{dcr} = \hat{V}_{dcr} \cos \alpha - \Delta V \qquad [6.9]$$

ومن [6.2] و [6.3] :

$$V_{dcr} = \frac{\sqrt{2} p V_a \sin \pi/p}{2\pi} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \beta)] \qquad [6.10]$$

وتكون المعادلة [6.10] مماثلة للمعادلة [6.2] .

تبين المعادلتان [6.3] و [6.10] ان تأثير التداخل على الفولتية $\hat{V}_{dcr}$ القصوى والتي تحدث عندما تكون $\alpha = 0,$ هو تقليلها بالعامل $\frac{1}{2}(1 + \cos \beta),$. ولكن عندما تكون α و β محدودتان كلتاهما يختلف عندئذ تأثيرهما شيئاً ما عن العاملين المنفردين المتمثلين بـ $\cos \alpha$ و $\frac{1}{2}(1 + \cos \beta).$.

ومن [6.7] و [6.8] يكون الهبوط بالفولتية بسبب التداخل هو

$$\Delta V = I_{dc} p X / 2\pi \qquad [6.11]$$

للربط القنطري الثلاثي الطور تكون $p = 3$ في [6.11] ويجب ان يكون ΔV مضاعفاً ذلك لأن المساحة ΔA تضيع في كلا نصفي الشكل 6.2, العلوي والسفلي . فلهذا النوع من الربط

$$\Delta V = 3 I_{dc} X / \pi \qquad [6.12]$$

ويوضح المعادلة [6.11] ان التداخل الحاصل نتيجة المفاعلة الحثية للدائرة ينتج هبوطاً بالفولتية الخارجة يتناسب مع التيار الخارج وكذلك المفاعلة . بالرغم من عدم امكانية تبدد أية قدرة في المفاعلة . والأنخفاض الناشيء في قدرة التيار المستمر الخارجة من زاوية تأخير الشبكة α وزاوية التداخل β لايكون نتيجة لأي تغير في قيمة ج . م . ت لتيارات وفولتيات الخط على جهة الأبتدائي للمحول . لكنه يكون نتيجة لعامل قدرة متأخر هو

$$\cos \phi \simeq \tfrac{1}{2}[\cos \alpha + \cos (\alpha + \beta)] \qquad [6.13]$$

وزاوية عامل القدرة المتأخر لمقوم موضحة كمياً في الشكل 6.3 . حيث أن الخط المركزي لتيار أنود يتخلف عن الخط المركزي لفولتيته.

اذا تدفق تيار الحمل كله الى أي أنود لزمن معادل لـ $\theta = 2\pi/p$ درجة نقطرية ، وبأهمال التداخل الذي قد يفترض أن يكون ثابتاً عند I_{dc} بسبب المحاثة في حالة وجود سيطرة شبكة أوعدمه . يعطى متوسط قيمة تيار الأنود I_m وقيمة ج. م. ت I_a له كالآتي

$$I_m = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/p}^{\pi/p} I_{dc}\,d\theta = \frac{I_{dc}}{p} \qquad [6.14]$$

$$I_a = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi/p}^{\pi/p} I_{dc}^2\,d\theta\right)} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{p}} \qquad [6.15]$$

وفي حالة الأشتغال الطبيعي يحمل كل صمام من صمامات الربط النجمي المزدوج تياراً مقداره $I_{dc}/2$ فقط عندما تكون $p = 3$ بحيث أن ج. م. ت تيار الأنود المعطى بالمعادلة [6.15] يصبح $I_a = I_{dc}/2\sqrt{3}$, . ويكون تقنين الفولت أمبير لثانوي المحول محسوباً على أساس أستعمال قيمةج. م. ت للفولتية بين أي أنود وبين فولتية نقطـــة التفرع النجمي V_a المبين في المعادلة [6.3] كالآتي

$$6V_aI_a = 6(\hat{V}_{dcr}/1{\cdot}17)(I_{dc}/2\sqrt{3}) = 1{\cdot}481\,\hat{V}_{dcr}\,I_{dc}$$

ولهذا النوع من الربط . اذا عّرفنا T بأنه النسبة لعدد اللفات الكلية الموجودة على ملف طور الثانوي (كلا النصفين) الى تلك المناظرة لها على طور الابتدائي . فعندئذ يكون ج . م . ت لفولتية طور الابتدائي هو $2V_a/T$. . ان التيار المتدفق في طور واحد في الثانوي . قل الطور a في الشكل 6.1, . يشتمل على تيار $I_{dc}/2$ من a_2 الى a_1 لفترة 120° . تيار مقداره صفر لفترة 60° . و $I_{dc}/2$ من a_3 الى a_4 لفترة 120° وكذلك صفر مرة اخرى لفترة 60° . وهذا يعطي تيارا فعالا (ج . م . ت) مقداره $I_{dc}/\sqrt{6} = \sqrt{2}I_a$ يتدفق في نصف عدد لفات الطور a . (ولاجل ان يتدفق هذا التيار بصورة فعلية فـي لفات الطور جميعها يكون على كل نصف من نصفي الملف ان يحمل تياراً في كـــلا الأتجاهين وكل اتجاه من اتجاهي التدفق يجب ان يشغل في كل دورة مايعادل ثلثها . على هذا الأساس يكون ج . م . ت تيار الأبتدائي هو $I_aT/\sqrt{2}$ ويكون تقنين الفولت أمبير للابتدائي :

$$3(2V_a/T)(I_aT/\sqrt{2}) = 3\sqrt{2}V_aI_a = 1{\cdot}047\,\hat{V}_{dcr}\,I_{dc}$$

ان نسبة قدرة التيار المستمر الخارجة الى فولت امبيرات التيار المتناوب الداخلة والتي قد تحتسب بالطريقة المبينة سلفا يشار اليها في بعض الاحيان بعامل الاستخدام . من الواضح انه كلما كان هذا العامل كبيرا كانت مزايا المنظومة جيدة . اما ذروة فولتية العكس عبر اي صمام والتي تكون عاملاً مهماً في تقويم الفولتيات العالية فقد يحصل عليها من [6.3] ومن صيغ امواج الفولتية . مثال على ذلك . فان تأمل الشكل 6.1 يبين انه في اللحظة t_1 . تكون الفولتية القصوى عبر الصمام b_1 والذي يكون في حالة عدم توصيل هي $\sqrt{2}V_a+\frac{1}{2}(\sqrt{2}V_a+0{\cdot}5\sqrt{2}V_a)$ وهذه تعطي من [6.3] ول $p = 3$ ذروة فولتية عكس مقدارها $2{\cdot}09\hat{V}_{dcr}$. وفي الجدول 6.1 تلخيص لنتائج حسابات الكميات المذكورة سلفا لكلا الربطين قيد الدراسة .

ومع أن الصمامات في قنطرة مقوم ثلاثية الطور عليها أن تحمل: ضعف قيمة التيار المار في صمامات المقوم النجمي المزدوج الا انها يجب ان تتحمل نصف ذروة فولتية العكس وتكون أجهادات الفولتية حرجة بصورة كبيرة في صمامات جهاز تحويل فولتية التيار المستمر العالية .h.v.d.c ولذلك يجب استخدام صمامات لها انود مشترك اوصمامات

الجدول 6·1 مقارنة بين ربطين

	ربط نجمي مزدوج سداسي الطور	ربط قنطري ثلاثي الطور
ج . م . ت لفولتية طور ثانوي المحول	$0{\cdot}855\hat{V}_{dcr}$	$0{\cdot}427\hat{V}_{dcr}$
ذروة فولتية العكس	$2{\cdot}09\hat{V}_{dcr}$	$1{\cdot}045V_{dcr}$
متوسط تيار الانود	$0{\cdot}167 I_{dc}$	$0{\cdot}33I_{dc}$
تقنين الفولت امبير لثانوي المحول	$1{\cdot}481\hat{V}_{dcr}I_{dc}$	$1{\cdot}047V_{dcr}I_{dc}$
تقنين الفولت امبير لابتدائي المحول	$1{\cdot}047\hat{V}_{dcr}I_{dc}$	$1{\cdot}047\hat{V}_{dcr}I_{dc}$
ذروة تيار الانود	$0{\cdot}5I_{dc}$	I_{dc}

متعددة تربط على التوازي لغرض زيادة تقنين التيار للربط القنطري . لكن هذه العملية لاتعد من المساويء حيث أنه بسبب القدرات العالية التي تتضمنها مشاريع فولتية التيار المستمر العالية (h.v.d.c.) . لاتستخدم اجهزة تحويل تكون انودات الأطوار

الثلاثة (أو أكثر) فيها مجتمعة كلها في حاوية واحدة بأية حال من الاحوال . ومن المزايا الأخرى للربط القنطري ان ارتداد القوس (الأشعالات المرتدة) يمكن السيطرة عليها بسهولة وذلك بجعل الشبكات جميعها سالبة بحيث أنها تقفل الصمامات جميعها. ان ارتداد القوس او الأشعال المرتد هو فقدان خاصية التوصيل باتجاه واحد لصمام ما عندما يوصل الصمام باتجاه مخطوء بينما يكون الأنود سالباً بالنسبة الى الكاثود ، وقد يكون هذا نتيجة محتملة لقذف الكتروني من الشوائب الموجودة على سطح الأنود. وفي الربط النجمي المزدوج ، لايمنع انحياز سالب على الشبكات مرور تيار متناوب في انود متعرض لعطل الى الحمل ورجوعه الى الطور المتأثر بهذا العطل عن طريق نقطة التفرع النجمي ووجب بذلك فتح قاطع دورة التيار المتناوب . على أية حال ففي الربط القنطري وبسبب وجود صمامين مربوطين على التوالي يعملان دائماً على تجهيز الحمل ، لايمكن ان يستمر الصمام المعرض للعطل في حمل تيار اذا كانت شبكات الصمامات الصالحة الأخرى مقيدة ، لذا تكون فرصة حدوث ارتداد قوسية على صمامين وفي الوقت نفسه بعيدة . ويتم حرف مسار التيار المستمر وقتياً خلال صمام امرار عند ايقاف القنطرة (انظر الشكل 6.2) .

وفي حالة ربط خطوط نقل الفولتية المستمرة العالية h.v.d.c. العابرة للبحار فيما بينها تشغل مجموعة صمامات وخلال ثانية واحدة لا أكثر بعد حدوث ارتداد القوس (وهذه الفترة تكون أقل في بعض الحالات) وفي معظم الحالات يعود الصمام المعرض للعطل الى حالته الطبيعية مرة اخرى بعد هذه العملية .

لقد توخينا عمل مقارنة مختصرة هنا بين ربطين ، ولكن لايوجد هناك مايلائم مشاريع فولتية التيار المستمر العالية مثل دائرة القنطرة الثلاثية الطور .

6.3 التقويم العكسي (التغيير) Inversion

عندما يقوم جهاز تحويل بالتقويم ، أي يحول الطاقة من منظومة تيار متناوب الى طاقة تنساب في منظومة تيار مستمر أو حمل معين ، فان تدفق التيار يكون من الأنود الى الكاثود . ذلك لأنه يجب ان يكون باتجاه واحد داخل صمام تقويم أو ثايرستور بحيث يكون الكاثود الطرف الموجب لخرج التيار المستمر . وعندما يتطلب تشغيل جهاز التحويل مقوماً عكسياً بحيث تؤخذ الطاقة من منظومة التيار المستمر وتغذى الى منظومة تيار متناوب موجودة أو مفتعلة ذاتياً ، لايمكن عكس اتجاه التيار في صمامات جهاز التحويل أو

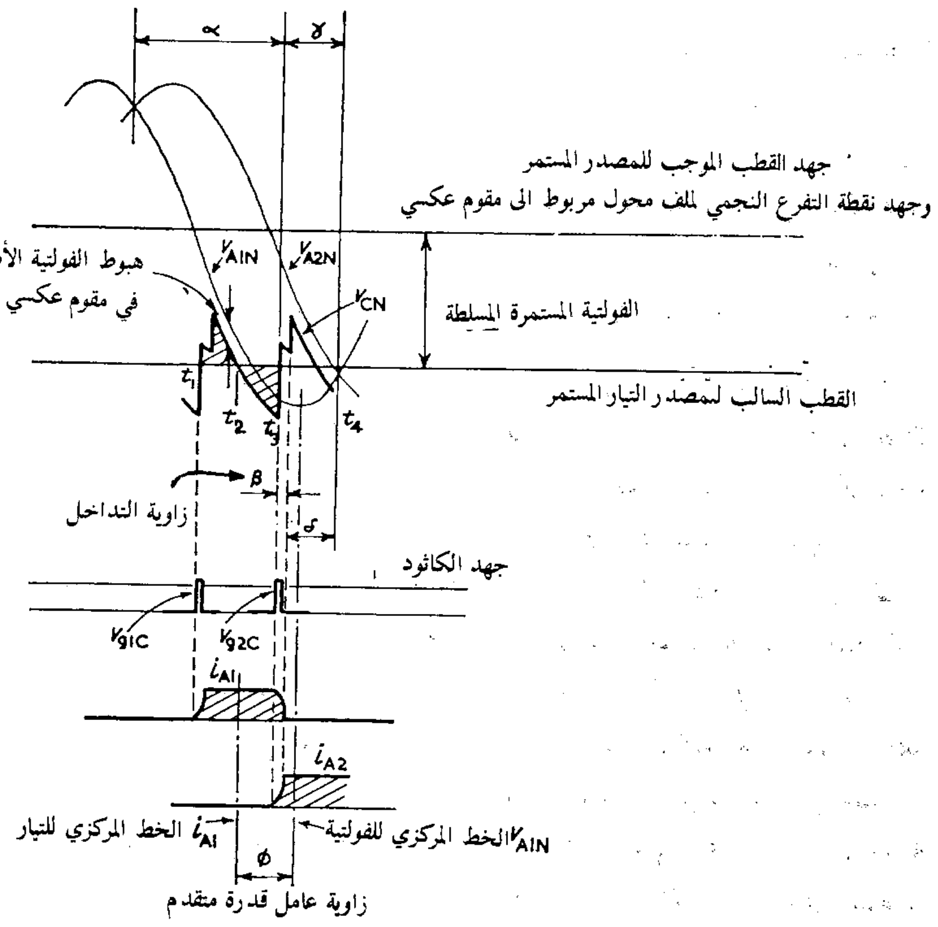
العناصر شبه الموصلة . وحيث تختلق منظومة تيار متناوب بوساطة المقوم العكسي ، فمثلاً في مسيّرات محركات التيار المتناوب ذات السرعة المتغيرة المجهزة بمقومات عكسية مزودة بثايرستورات لتغيير التردد . تعمل الثايرستورات على انها مقاليد بحيث تربط تياراً مستمراً ذا قطبية متناوبة على الماكنة بتردد مسيطر عليه بوساطة تردد نبضات البوابة . على الجانب الآخر . حيث يراد تجهيز طاقة الى منظومة موجودة ذات تردد ثابت لها فولتيات وتيارات جيبية ثلاثية الطور . يجب ان يؤخر مرور التيار بوساطة سيطرة الشبكة أو البوابة الى وقت معين يتم خلاله دفع التيار من قبل مصدر التيار المستمر في اتجاه معاكس الى الفولتية الناتجة في ذلك الطور من ملف المحول التي تسببها منظومة التيار المتناوب الموجودة . وفي حالة تطبيقات القدرة المستمرة ذات الفولتية العالية h.v.d.c. فمن الضروري وجود منظومة تيار متناوب أو معوض تزامني مربوطة الى المقوم العكسي لكي يكون بالأمكان تأسيس الدوران الطوري والتردد والفولتية . وبذلك تسبب حالة التبدل في التيار . بالأضافة الى ذلك تجهيز القدرة المتفاعلة (أنظر ماسيأتي ذكره لاحقاً) . ان أي صمام لايمكن ان يوصل عندما يكون أنوده سالباً بالنسبة الى كاثوده ، ولكنه يوّصل فقط خلال الزمن الذي تتجاوز فيه الفولتية المستمرة المسلطة على دخل المقوم العكسي الفولتية المتناوبة المحتثة في ملف المحول من منظومة التيار المتناوب ، بحيث يكون الانود موجبا بالنسبة الى الكاثود بكمية مساوية لهبوط الفولتية الامامي . على هذا الاساس فان القطب السالب لمصدر التيار المستمر يجب ان يربط الى كاثودات الصمامات وكما موضح في الشكل 6.2, . في حين يكون الكاثود خلال عملية للمحول الموجب لدائره الحمل.

ولانجاز فعل العكس يجب ان تؤخر النبضة على أية شبكة الى ان تقوم الـ ق . د . ك المتناوبة بجعل الانود المناظر سالبا بالنسبة الى نقطة التفرع النجمي N للمحول (ويبقى هذا الجهد موجودا وان لم يكن هناك مخرج فيزياوي لهذه النقطة بسبب ملفات مربوطة بشكل مثلثي) . ولكن تكون هذه الـ ق . د . ك اقل من الفولتية المستمرة المسلطة . على سبيل المثال ، يمكن بدء التوصيل في الصمام 1 عند زمن t_1 في الشكل 6.4 والذي يوضح للسهولة حالات العكس بدون صمام ثان يقوم بالتوصيل على التوالي عوضاعن المقوم العكسي القنطري الربط المبين في الشكل 6.2. وخلال التوصيل سوف يكون الجهد V_{CN} لكاثود الصمام الموصل بالنسبة الى نقطة التفرع النجمي للثانوي اقل من جهد انوده (V_{A1N}) بقيمة تعادل قيمة هبوط الفولتية الامامي V_f . وقد يتوقف التوصيل في t_2 عندما تتوقف فولتية التجهيز المستمرة

بالزيادة على مجموع V_f وال ق . د . ك المتناوبة المحتثة في ملف المحول ان لم يكن هذا متضمنا محاثة كافية في الدائرة (انظر الشكل 6.2) . وبما ان التيار I_{A1} يكون ثابتا تقريبا في الفترة من t_1 الى t_2 فان الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي للمحث اولمجموعة محثات تعطى بالتقريب بوساطة المساحة المظللة الاولى في الشكل6.4 وذلـك لأن الفولتيـة اللحظيـة عبـر المحاثـة هـي الخـط العمـودي بيـن منحنـي V_{cN} والخـط الأفقـي الذي يمثل جهـد الطـرف السالـب

الخط العمودي بين منحنى V_{CN} والخط الافقي الذي يمثل جهد الطرف السالب للتيار المستمر . ويمكن انيستمر التوصيل الى مابعد t_2 حتى يتم استرداد هذه الطاقة باجمعها ، حيث يكون ذلك عندما تصبح المساحة المظللة الثانية مساوية للمساحة المظللة الاولى . واذا كانت فولتية المصدر المستمرة واطئة جدا فحينئذ تتم عملية استرداد الطاقة قبل ظهور النبضة الموجبة على الشبكة 2, ، لذا سوف يهبط التيار الى الصفر لحين وصول هذه النبضة . على اية حال فان التيار المتواصل يكون مطلوبا في الحالات الاعتيادية بدلا من التيار غير المتواصل . ويجب ان يحدث التبديل في الصمام 2 باية حال من الاحوال قبل لحظة الزمن t_4 ذلك لان الفولتية بعد هذه اللحظة الزمنية تصبح سالبة بالنسبة الى $A1$, بحيث يكون التبديل غير ممكنا . ويجب ان يبدأ التبديل مبكرا قبل الزاوية المناظرة لـ t_4 بفاصل ادنى مقداره β (زاوية التداخل او زاوية التبديل) زائدا δ_0 وهي الزاوية (او الزمن) الذي يستغرقه الصمام 1 ليصبح في حالة التخلص الايوني ، حتى لايأخذ مرة اخرى تيارا مفرطا من الصمام 2 عندما يصبـح موجبـاً أكثر بعـد اللحظـة t_4. وبعـد الزاوية δ_0 حيث تكون عملية التخلص الايوني قد تمت ، لايتمكن $A1$ من اخذ تيار مفرط من $A2$ وذلك لانه يكون مقيدا بوساطة الانحياز السالب الموجود على الشبكة . واذا ارتفع نطاق التخلص الايوني من قيمته الدنيا δ_0 الى δ ، فان التبديل سيبدأ بزاوية $(\beta+\delta) = \gamma$ قبل اللحظة t_4.

ومما يجب ملاحظته من الشكل 6.4 ان المقوم العكسي الذي تم قدحه مع زاوية تأخيرشبكة α مقاسة من نقطة التبديل الطبيعي كأنه مقوم له زاوية $\alpha = (\pi-\gamma)$ درجة نقطرية . واذا اهملت زاوية التداخل ، وبالتعويض بعد ذلك عن α بالزاوية $(\pi-\gamma)$ في [6.2] ومن التأمل في الشكل 6.4 يتضح ان فولتية التيار المستمر المسلطة لغرض العكس V_{dci} هي



الشكل 6.4 صيغ موجات عملية العكس .

V_{A1N} هي ق . د . ك متناوبة (بالنسبة الى N) محتثة في ملف محول عندما يربط مع الأنود الأول .

V_{A2N} هي ق . د . ك متناوبة (بالنسبة الى N) محتثة في ملف محول عندما يربط مع الأنود الثاني

V_{g1c} هو جهد شبكة الأنود الأول بالنسبة الى الكاثود .

V_{g2c} هو جهد شبكة الأنود الثاني بالنسبة الى الكاثود .

V_{CN} هو جهد الكاثود نفسه بالنسبة الى N خلال التوصيل .

$$V_{dci} = \frac{\sqrt{2}pV_a}{\pi}\sin\frac{\pi}{p}\cos\gamma + V_f \qquad [6.16]$$

في الحقيقة تكون قطبية الفولتية المستمرة الخارجة معاكسة للفولتية الخارجة في حالة اشتغال الدائرة مقوما اعتياديا والذي تمت مناقشته سلفا ، وقد تبدلت اشارة

هبوط الفولتية الامامي بالنسبة الى V_{dc} . كما هي الحالة في التقويم فان هبوط الفولتية ΔV الناتج عن مفاعلة حثية المتسبب في ظهور زاوية تداخل β والمعطى بالمعادلة [6.8] فبالتعويض في هذه المعادلة قيمة $\alpha = (\pi-\gamma)$ ينتج

$$\Delta V = \frac{\sqrt{2}pV_a}{2\pi} \sin \pi/p[\cos(\gamma-\beta)-\cos\gamma]$$

وعندما تكون $(\gamma-\beta) = \delta$ فان

$$\Delta V = \frac{\sqrt{2}pV_a}{2\pi} \sin \pi/p[\cos\delta-\cos\gamma] \qquad [6.17]$$

ولما كانت فولتية التيار المستمر المسلطة في المقوم العكسي يجب ان تزداد بمقدار يعادل هبوط الفولتية ΔV هذا (كما قد يتضح من الشكل 6.4) ، فان V_{dci} تستخرج من حاصل جمع [6.16] و [6.17] وذلك لزاوية تبديل محدودة ، بحيث ان

$$V_{dci} = \hat{V}_{dcr}\cos\gamma+\Delta V+V_f \qquad [6.18]$$

$$V_{dci} = \frac{\sqrt{2}pV_a}{2\pi} \sin \pi/p[\cos\delta+\cos\gamma]+V_f \qquad [6.19]$$

بتعويض مشابه في [6.7] يعطي :

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{2}V_a \sin \pi/p}{X}[\cos\delta-\cos\gamma] \qquad [6.20]$$

من [6.17] ، [6.20] نحصل على

$$\Delta V = I_{dc}pX/2\pi \qquad [6.21]$$

وهى القيمة نفسها لحالة التقويم .([6.11]) . اما للربط القنطري الثلاثي الطور فان [6.18] و [6.21] وباحتواء 6·21 على العامل 2 اللازم عند التشغيل بصمامين مربوطين على التوالي ، يعطيان

$$V_{dci} = \hat{V}_{dcr}\cos\gamma+\frac{3I_{dc}X}{\pi}+V_f \qquad [6.22]$$

بطريقة اخرى يمكن كتابة فولتية التيار المستمر من الشكل 6.4 كالاتي

$$V_{dci} = \hat{V}_{dcr} \cos \delta - \Delta V + V_f \qquad [6.23]$$

ومن [6.21]

$$V_{dci} = \hat{V}_{dcr} \cos \delta - \frac{I_{dc} p X}{2\pi} + V_f \qquad [6.24]$$

بتعويض [6.20] في [6.24] تنتج [6.19].

واذا لم تكن هناك محاثة واذا حدث التخلص الايوني بصورة سريعة ولامحدودة فان δ ، β قد يكون كل منهما صفرا . بذلك تكون γ صفرا ايضا . لحالة مثل هذه فالمعادلة [6.19] تبين ان فولتية التيار المستمر المسلطة ستكون $\hat{V}_{dcr}+2V_f$، وباهمال هبوط الفولتية الامامي سوف تصبح $\hat{V}_{dcr}$ (وكما عرفت بوساطة المعادلة [6.3] بجعل $V_f = 0$) . بصورة عامة يمكن كتابة [6.19] باهمال V_f وكالاتي :

$$V_{dci} = \frac{\hat{V}_{dcr}}{2} (\cos \delta + \cos \gamma) \qquad [6.25]$$

يمكن الملاحظة من الشكل 6.4 ان الخط المركزي لتيار الانود يكون متقدما على الخط المركزي لفولتية الانود نفسه . وهذا يدل على ان المقوم العكسي يجهزتيارا بعامل قدرة متقدم الى منظومة تيار متناوب . وهذا اسلوب اخر في التعبير يبين ان المقوم العكسي يكون مثل المقوم حيث يستهلك قدرة متفاعلة (متأخرة) من منظومة التيار المتناوب التي يكون مربوطا اليها . ذلك لان مصدراً لقدرة متفاعلة متقدمة يكون مكافئا لمصب قدرة متفاعلة متأخرة . ان عامل القدرة هذا يكون بالتقريب العامل الذي تزداد فيه فولتية التيار المستمر الداخلة (حيث كان عامل النقصان للمقوم) لذا من [6.25]

$$\cos \phi \simeq \tfrac{1}{2}(\cos \delta + \cos \gamma) \qquad [6.26]$$

ومع انه لايمكن ان تنتقل قدرة عبر رابط بيني interconnector للتيار المباشر في مشروع فولتية تيار مستمر عالية (h.v.d.c.) ، فان كلا من المقوم الواقع في نهاية الارسال والمقوم العكسي الواقع عند نهاية الاستلام . يستهلك قدرة متفاعلة (متأخرة) ، واستهلاك القدرة هذه يكون جزئياً بسبب المفاعلة التسربية للمحول ومفاعلة منظومة التيار المتناوب المؤثرة على عملية التبديل وكذلك جزئياً بسبب سيطرة الشبكة ، وفي المقوم والمقوم العكسي كليهما تكون القدرة المتفاعلة المستهلكة حوالي نصف القدرة (الفعالة) المنتقلة بصورة دورية . وبما ان القدرة المتفاعلة (المتأخرة) تجهز الى المقوم العكسي من قبل منظومة التيار المتناوب الذي يجهزها المقوم العكسي نفسه بقدرة (فعالة) ، فان هذه العملية تكون مكافئة لمقوم عكسي يجهز تياراً الى منظومة التيار المتناوب بعامل قدرة متقدم وكما أشير اليه سلفاً . ان معظم المنظومات لاتمتلك قدرة متفاعلة كافية متيسرة ذلك لان احمالها تستهلك ايضاً قدرة متفاعلة (متأخرة) . لهذا السبب فان القدرة المتفاعلة تجهز الى المقوم العكسي اعتيادياً بوساطة المعوضات التزامنية (متسعات) او بوساطة متسعات ستاتيكية تفرعية (توازٍ) . ويمكن استعمال المعوضات التزامنية ايضا لضمان ثبوت التردد ولتجهيز قدرة متفاعلة اضافية الى احمال المنظومة . ولكن اذا لم تكن هذه المتطلبات الاضافية موجودة تكون كلفة المعوضات التزامنية الاجمالية ومفاقيدها الكبيرة سبباً في استخدام المتسعات التفرعية الارخص ثمناً . وكذلك بسبب مزايا الاخيرة كونها تنضم مع مرشحات التوافقيات كما هي الحالة في الوصيل العابر للبحار . وفي حالة تجهيز تيار متناوب لمساحة ما كجزيرة مثلا ليس فيها منظومة تيار متناوب خاصة بها تستخدم متسعة معوضة لتعطي فولتية متناوبة بتردد صحيح بحيث ان الصمامات قد تحدث فيها عملية تبديل . علاوة على تجهيز قدرة متفاعلة الى المقوم العكسي وكذلك الى الاحمال .

6.4 منظومات التيار المستمر ذات الفولتية العالية (h.v.d.c.)

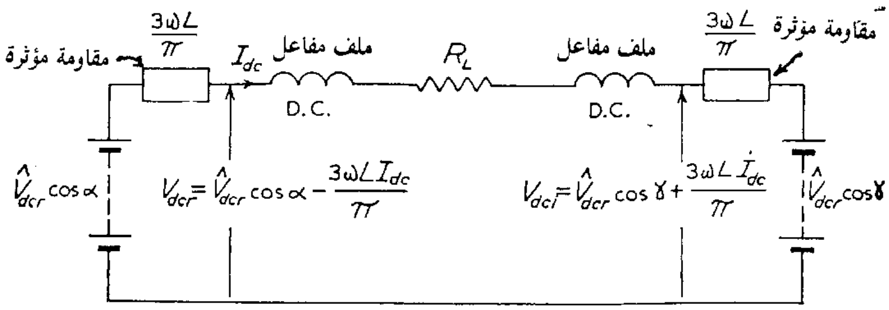
High-voltage d.c. systems

في الصفحات القليلة التالية من هذا الكتاب سنقتصر اهتمامنا على عرض الأمور الأكثر أهمية للتشغيل والأستخدام التطبيقي لوصيلات الـ (h.v.d.c.) بوصفها جزء من منظومات القدرة . مع أنه قد تم تقديم شيء بسيط حول الموضوع في الفقرة 6.4.1, الا أن من غير الممكن . على سبيل المثال . التطرق بالتفصيل لعملية مراكبة مقوم وكذلك مراكبة جهاز تحويل . والمراكبة هو الاسم الذي يطلق على تنظيم خواص كل منهما

متضمنا . بذلك السيطرة الذاتية على زوايا اشعالها بحيث تعطي هذه الاجهزة الفولتية والتيار المطلوبين وكذلك تدفق القدرة باقل استهلاك ممكن للقدرة المتفاعلة . علاوة على الحمايــة الوافية ضد الاعطال . لقد اعطيت بعض المراجع في نهاية هذا الفصل والتي مع مجلة التيار المستمر «'Direct Current',» تمكن الطالب من البدء في دراسة الموضوع بتفصيل اعمق .

6.4.1 الاشتغال OPERATION

يتألف وصيل قدرة تيار مستمر بفولتية – عالية بصورة مبدئية من رابط بيني تيــــار متناوب / تيار مستمر/ تيار متناوب يتم خلاله أخذ القدرة من منظومة تيار متناوب متناوب عن طريق مقوم قنطري ثلاثي الطور . وتغذى خلال وصيل تيار مستمر قد يكون قابلواً . اوخط نقل طويلا أووصيلا له طول ظاهري مقداره صفر . يوجد عند نهايته مقوم عكســي قنطري ثلاثي الطور يغذي قدرة لمنظومة تيار متناوب ثانية . قد يكون انسياب القدرة باتجاه واحد . كما كانت في المشروع التجاري الاول حيث جرى تجهيز 20 MW من المقاطعات الرئيسية في السويد الى جزيرة جوتلاند . اوأن الانسياب يكون متعاكساً كما هي الحالة في الوصيلات العابرة للبحار . ذلك لأن جهاز التحويل يمكن ان يصبح مقوماً أومقوماً عكسياً وذلك تبعاً لاسلوب السيطرة على الشبكة . ولما كان اتجاه التيار في اجهزة التحويل لايمكن تغييره . فان تبديل اتجاه القدرة يتم بعكس قطبية الفولتية المستمرة ، ويتم الحفاظ على قطبية القابلو بتشغيل فواصل خاصة لعكس الفولتية .



الشكل 6.5. دائرة مكافئة اساسية لوصيل مقوم / مقوم عكسي بتشغيل فواصل خاصة لعكس الفولتية .

وتمثل الدائرة المكافئة البسيطة في الشكل 6.5 دائرة التيار المستمر (حيث يكون V_f مهملاً في مقومات الفولتية العالية) . ويتم الحصول على فولتية المقوم الخارجة V_{dcr} من [6.9] و [6.22] . والفولتية الداخلة الى المقوم العكسي V_{dci} من [6.22] . ويكون التيار المنساب من المقوم الى المقوم العكسي .

$$I_{dc} = \frac{V_{dcr} - V_{dci}}{R_L} \qquad [6.27]$$

والقدرة المتوصلة P يشار اليها اصطلاحا بانها تلك التي عند نهاية الارســـال

$$P = V_{dcr} I_{dc} \qquad [6.28]$$

وحالة الاشتغال الامثل تكون عند القيمة القصوى للفولتية V_{dci} المصممةلهذا الغرض وكذلك يتم تغير P باستعمال سيطرة الشبكة للمقوم لتغير فولتية الخارجة V_{dcr} وبذلك يسيطر على قيمة I_{dc} .

ومن المعادلات [6.3], [6.9], [6.11] وكذلك الجدول 6.1 يكون ج . م .ت فولتية الخط المتناوبة $V_{ar} = \sqrt{3}V_a$ على ثانوي المحول النجمي الربط المغذي للمقوم المبين في الشكل 6.2 حيث تكون فولتية الخارجة V_{dcr} وتيـاره الحقيقي الخارج I_{dc} (له قيمة مقننة هي $\hat{I}_{dc}$) مرتبطين رياضياً كالآتي

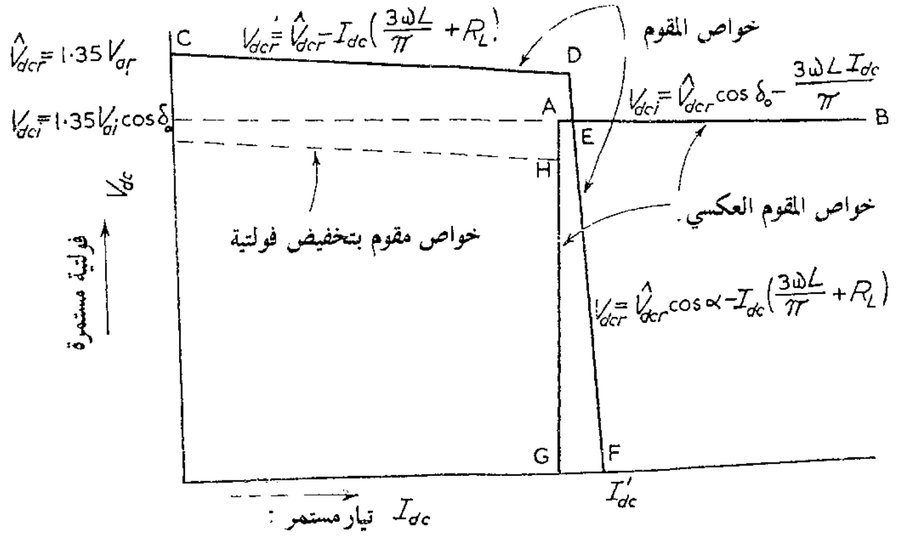
$$V_{dcr} = 1{\cdot}35\ V_{ar}(\cos\alpha - I_{dc}X/2\hat{I}_{dc}) \qquad [6.29]$$

والمعادلة المناظرة لهذه في المقوم العكسي والتي تتضمن فولتية الخط V_{at} على ملف محول نجمي الربط مربوط اليه . بالامكان كتابتها من [6.24] كما يلي

$$V_{dci} = 1{\cdot}35\ V_{ai}(\cos\delta - I_{dc}X/2\hat{I}_{dc}) \qquad [6.30]$$

توضح كل من [6.29] ، [6.30] ان فولتيات منظومة التيار المتناوب تفرض تحديدات على V_{dcr} و V_{dci} . ولكن هذه الفولتيات يمكن ان تتغير نوعاً ما بوساطة مأخذ التغير (الفقرة 6.7, من الجزء الأول) . وكما هو واضح من [6.27] يكون التيار حساساً لتغيرات صغيرة في قيم V_{dcr} V_{dci} . وقد يتم الحفاظ على القيمة المطلوبة له ولاي ظرف من ظروف التحميل باستخدام سيطرة الدارة المغلقة . قد تتم المحافظة على

V_{dci} بحيث تكون اقرب ما يمكن الى قيمته القصوى $\hat{V}_{dcr}$ (انظر المعادلة [6.24]) وذلك بالحفاظ على الزاوية δ بحيث تصبح قريبة جداً من قيمتها الامينة الدنيـــا $\delta_0 (\simeq 15°)$ لكي تقلل الى الحد الادنى استهلاك القدرة المتفاعلة للمقوم العكسي . وهذا يعطي الخواص AB للفولتية V_{dci} في الشكل 6.6 والتي تكون منحدرة بسبب الهبوط في الفولتية الناتج عن المحاثة ([6.24]) . وبالتشابه تكون خواص المقوم لزاوية تاخير شبكة مقدارها صفر لها ميل سالب (الجزء CD في الشكل 6.6) . لكن دوائر السيطرة تغير من قيمة α بحيث تعطي الخواص DEF وتمنع التيار من تجاوز الحد المطلوب وهو I'_{dc} . يكون التقاطع E لهذه الخواص هو حالة الاشتغال الطبيعي لتنظيم التيار هذا . ومن الممكن ان تسبب التغيرات في كل من V_{ar} و V_{ai} هبوط خواص المقوم بصورة عابرة اسفل خواص المقوم العكسي خلال فترة لا تتجاوز بضع ثوان ، وذلك عندما تشتغل عتلة تغير المآخذ لتعيد الظروف الى طبيعتها . وبما ان هذه العملية قد تسبب توقف نقل أي شكل من اشكال القدرة فانها تمنع بوساطة سيطرة المقوم العكسي بحيث تؤدي زيادة الزاوية γ الى تقليل V_{dci} ([6.25]) وكذلك باعطاء الخواص AHC مما يجعل الاشتغال يستمر عند H وبتيار مخفض جزئياً حتى يستعيد قيمته بالسيطرة وتغيير المأخذ . ان حد التيار بين نقطتي مثل H و E يجب ان يكون كافياً لتجنب التشغيل اللخطي لوسيلتي السيطرة على انتظام فولتية في المقوم والمقوم العكسي معاً ، وعندما يراد تنظيم التيار عبر وصيل التيار المستمر الى قيمة جديدة ، يكون من الضروري في هذه الحالة ضبط المسيطرين سوية وذلك للابقاء على حد التيار السالف الذكر . أما حد الفولتية DE فهو عبارة عن حل وسط بين تجنب تكرار السيطرة على المقوم العكسي وما تجره من تأثير على التيار وبين تقليل تعويض القدرة المتفاعلة الى الحد الأدنى بالمحافظة على α لتكون أقل ما يمكن (انظر [6.13] لترى تأثير الزاوية α على عامل القدرة) .



الشكل 6.6. خواص مقوم ومقوم عكسي ذو ربط قنطري مع حدود التيارات العليا والدنيا لهما :

6.4.2 التطبيقات APPLICATIONS

في ظروف خاصة ، تدعو الضرورة فيها الى توسيع منظومة تجهيز قدرة معينة ، هناك عدد من الأمور التي قد تجعل منظومة تيار مستمر ذات الفولتية العالية متميزة عن غيرها من الناحية الفنية ، لكن عند مقارنتها مع حلول أخرى فأنها لاتكون دائماً أساليب الحلول الأكثر أقتصادية. ان المقارنات الأقتصادية هذه قد تتغير من موقع وظروف معينة الى أخرى ، وهي على أية حال خارج نطاق هذا الكتاب . وتلغي الفرضيات الموضوعة معظم المقارنات البسيطة بحيث أنه سيتم التطرق الى مناقشة عامة حول الموضوع الحالي فقط .

ان ثلاثاً من أهم المزايا الرئيسية لمنظومات التيار المستمر والتي خططت على أنها جزء من توسعات منظومة تيار متناوب منفذة هي :

(أ) ان كلفة خطوط وقابلوات التيار المستمر تكون أقل من خطوط وقابلوات التيار المتناوب . حيث أن قابلوات التيار المستمر ذات الفولتية العالية يمكن أن تكون أطول من قابلوات التيار المتناوب المناظرة لها بسبب تلافي تيار شحن الحالة المستقرة فيها ؛

(ب) من الممكن جلب قدرة أكبر الى منظومة تيار متناوب عن طريق وصيل تيار مستمر بدون رفع مستوى العطل وتقنيات قواطع الدورة (تمت مناقشة مستويات العطل في الفصل من الجزء الأول) ؛

(جـ) ان وصيل التيار المستمر يكون لاتزامناً ، وهذا يعني ان منظومتي تيار متناوب عند كلتا الجهتين لايتطلب السيطرة عليهما في الطور نفسه أو حتى أن يكون لهما التردد نفسه تماماً كما هي الحالة في وصيل تيار متناوب ، لذا يمكن السيطرة على القدرة المنقولة مباشرة . وليس هناك خطر من عطل في منظومة بحيث يسبب فقدان الأستقرارية العابرة في المنظومة الأخرى .

كذلك فأن خطوط التيار المستمر العلوية المعلقة نفسها تكون دائماً أكثر اقتصادية من خطوط التيار المتناوب في حالة غياب الموصل المحايد المؤرض من التيار المستمر (او اذا كان معزولاً ومحملاً بصورة خفيفة) بحيث يكون هناك موصلان للتيار المستمر أحدهما موجب والآخر سالب بالنسبة للأرض . واذا كانت الأبراج والعوازل مصممة للأشتغال للتيار المستمر . فأن مسار التسربية عبر سطح العازل يميل ليكون أطول من ذلك المطلوب لذروة فولتية خط الى الأرض (طور) المتناوبة المساوية لفولتية التيار المستمر ، ويعود هذا الى

الترسيب الكهروستاتيكي للغبار الجوي المحيط ، حيث يحدد هذا الترسيب من فولتية التيار المستمر مع أنه يجعل تقنين موصل معين في حالة التيار المستمر أعلى بقليل من تقنين الموصل نفسه في حالة التيار المتناوب ، والزيادة في انتقال الحمل او الأنخفاض في تكاليف خط للحمل نفسه في حالة التيار المستمر تحبطها الزيادة في تكاليف الأجهزة الطرفية فقط (أجهزة التحويل ، مرشحات التوافقيات ، ... الخ) للنقل في نقطة الى نقطة أخرى اذا كان طول الخط أكثر من 650 كيلومتر معتمدة بذلك على عدد من العوامل .

في حالة القابلوات الأرضية يكون الطول الأقتصادي لوصلة التحويل أقل بكثير من ذلك الذي لخطوط النقل حيث أن هذا الطول قد يكون أقل من 40 كيلومتر . وسبب ذلك يعود بصورة رئيسية (وكما تمت مناقشة في الفصل 5 من الجزء الأول) الى أن شدة عزل التيار المستمر في عوازل قابلوات الفولتية الفائقة E.H.V. تكون حوالي ثلاثة أمثال شدة عزل التيار المتناوب ، وقسم من هذه الأسباب يعود الى كون تقنين التيار المستمر لقابلو معين يتجاوز تقنين التيار المتناوب للقابلو نفسه بسبب غياب تيار الشحن . والفقد في العازل الكهربائي وفي الغلاف والمقاومة الواطئة للموصل . ان معظم قابلوات التيار المستمر لاتحتاج الا الى حفريات ضيقة جداً اذا ماقورنت مع قابلوات التيار المتناوب ذات التقنين المماثل وأن أحد تأثيرات الأشتغال بالتيار المستمر هوتقليل نسبة الكلفة بين الخطوط العلوية المعلقة وبين القابلوات الأرضية .

والمزية الثانية ، كما أشير اليها في (ب) سلفاً ، تظهر من الحقائق القائلة أن وصيل تيار مستمر يقوم بنقل قدرة متفاعلة وأن الطاقة المخزونة في أجهزة التحويل تكون ضئيلة جداً بسبب عدم أحتوائها على قوة الأستمرار . وعلى هذا الأساس فأن مشاركة وصيل التيار المستمر في تغذية تيار العطل لمنظومة التيار المتناوب وعلى أي جهة من جانبيها تكاد تكون مهملةً. ولكن تتم مواجهة متطلبات النمو التصاعدي للحمل في المملكة المتحدة

(والذي قل في السنوات الأخيرة بمعدل 4% سنوياً للطلب الأقصى بسبب نقص التوسعات الصناعية ومردودات الغاز والزيت في بحر الشمال . ومنذ ذلك الحين أصبح هذا النقصان متبوعاً بأنخفاضات دقيقة في الطلب الكلي) . فقد أصبح من الضروري في النهاية أبدال منظومات النقل الحالية بأخرى جديدة لها فولتية أكبر . (بحدود مليون فولت) او (شبكات فائقة كما يطلق عليها أحياناً) تربط مع خطوط 400 ك.ف. أو 275 ك.ف المربوطة اليها معظم مجموعات التوليد الحديثة والكبيرة جداً .

ان تأسيس شبكات رئيسية جديدة بصورة كاملة يجب ان يؤخر التفكير به لاطوال مـــدة ممكنة (أو تجنبه بصورة كاملة) ذلك لاسباب تتعلق بعوامل كثيرة كالاقتصاد والتجهيز والامنية ووجود الاراضي اللازمة في الاماكن المناسبة لنصب المحطات الثانوية والخطوط . وهناك اسلوبان لتقوية المنظومة باستخدام وصيلات التيار المستمر وذلك لتجنب أو تأخير انشاء منظومة تيار متناوب رئيسية جديدة . اولها تقسيم منظومة القدرة الواحدة الحاضرة في المملكة المتحدة الى عدد من المنظومات تكون منفصلة عن بعضها فيما عدا وجود وصيلات خاصة فيما بينها . حيث يتم خلال هذه الوصيلات سريان تيار عطل صغير جداً من منظومة واحدة الى الاخرى ولكن خلال هذه الوصيلات يتم انتقـال الاحمـال فيما بينها . هناك مجموعتان بديلتان من الوصيلات (الروابط) الخاصة وهما وصيـــلات التيار المستمر والوصيلات الرنانة (راجع الفصل 3) حيث ما زال العمل جارياً على دراسة محاسنها النسبية (التي يحتمل ان تبين ان وصيلات الرنين هي الأكثر اقتصاداً في العموم) وكذلك الاجابة عن التساؤلات الواردة في تقسيم المنظومة الى اجزاء متعددة .

أما الاسلوب الثاني الذي يمكن من خلاله تقوية المنظومة بوساطة وصيلات التيار المستمر بطريقة تؤدي الى تأخير الاحتياج الى منظومة رئيسية جديدة فيكون بربط مقومات الى محطة أو محطات كبيرة حيث يتم تجهيز قدرة عبر خط أو قابلو للتيار المستمر الى محطة تقويم عكسي مربوطة الى منظومة نقل ثانوية (أو الى نقطة تجهيز جسيمة في منظومـــة التوزيع) . وموضوعة في مساحة يكون فيها التحميل كبيراً . بهذا الاسلوب فان محطات التوليد التي سوف يكون من الصعب نصبها قرب الاحمال يمكن ان تنشأ حيث يكون الوقود والماء متيسراً بصورة جاهزة . في حين من السهولة بمكان ايجاد الفضاء اللازم لمحطات التقويم العكسي الصغيرة نسبياً قرب مناطق الحمل . وفي حالة فشل وصيل التيار المستمـــــر يمكن نقل طاقة الربط (التيار المتناوب) بين محطات التوليد ومنظومة النقل الرئيسية . ان مشروع كنجز نورث سوف يجهزنا ببيانات ثمينة يتم منها تثمين المزايـــــا الاقتصادية ومزايا التشغيل للوصيلات المماثلة التي قد يتم البحث فيها مستقبلاً . في هذا المشروع ربط مولد قدرة 500-MW ومنظومة اساسية ذات 400 ك . ف الى محطة تحويل في كنجز نورث . حيث منها يمكن نقل قدرة بحدود 320 MW (وفي الاتجاه المعاكس اذا كان ذلك ضرورياً) عبر منظومة قابلو ثلاثية السلك للتيار المباشر بفولتيـة 266 ± ك . ف الى مقاطعة بدنكتن و 320 MW اخرى الى مقاطعة ولسدن وبدون اي تيار مُراق (خارج عن التوازن) قد يتدفق في سلك المحايد للقابلو بين مركزي هذين الحملين .

في مثل هذا النوع من تطبيقات منظومة التيار المستمر ذات الفولتية العالية تؤدي المـزية الثالثة المذكورة في (ج) سلفاً دوراً مهماً وذلك لأنه من الناحية الحيوية امتلاك سيطرة مرنة على انتقال القدرة . والتي قد لاتكون من السهولة الحصول عليها بالربط التزامنـي حيث يكون اقتسام الحمل بين الدوائر المتوازية معتمداً على ممانعات الدوائر الأساسية .

لقد كانت المزية (ج) الثالثة هذه مهمة بصورة خاصة في حالة الوصيل العابر للبحار ذي قدرة 160-MW . بفولتية ± 100 ك.ف . وذلك لأنه كان من الضروري نصب أجهزة سيطرة على التردد باهضة التكاليف في المملكة المتحدة سوية مع وصيل تيار متناوب للحصول على انتقال مستقر للقدرة ، في حين ان وصيل التيار المستمر يجعل هذا الأمر ممكناً وان كان هناك اختلاف في التردد بين المقاطعتيـن .

ان تطور مقومات أشباه الموصلات قد وصل الآن مرحلة من التقدم فمثلاً مشروع (انجا-شابا) في زائير الذي هو الآن في مرحلة الاستكمال ينقل 560 MW عند فولتية 500± ك.ف عبر خط علوي معلق طوله 1700 كيلومتر . وتحتوي كل وحدة على مئات من الثايرستورات المبردة بالهواء ومربوطة على التوالي بتدرج جهدي لغرض مساواة الفولتيـات عـلى كل ثايرستور .

المراجع

ADAMSON, C. & HINGORANI, N. G. 1960. *High Voltage Direct Current Power Transmission*. Garraway, London.

BRADLEY, D. A., CLARKE, C. D., DAVIS, R. M. & JONES, D. A. 1964. Adjustable-frequency invertors and their application to variable-speed drives. *Proc. I.E.E.*, **111**, 1833–1846.

CAILLEZ, H., CASSON, W., LAURENT, P. & SCHOFIELD, H. R. 1963. Design and construction of the cross-Channel d.c. inter-connector. *Proc. I.E.E.*, **110**, No. 3, 603–618.

CASSON, W., LAST, F. H. & HUDDART, K. W. 1966. The introduction of H.V.D.C. transmission into a predominantly A.C. network. *Electrical Review*, **178**, No. 8, 290–295.

ENGSTROM, L. 1975. Refining copper with HVDC., *I.E.E.E. Spectrum*, 40–55.

GAVRILOVIC, A. 1966. Basic facts of A.C./D.C. Conversion. *Electrical Review*, **178**, No. 8, 296–300.

KING, K. G. 1963. The application of silicon controlled rectifiers to the control of electrical machines. *Proc. I.E.E.*, **110**, No. 1, 197–204.

LANE, F. J. 1969. Engineering unlimited. *Proc. I.E.E.* **116**, No. 1, 89–95.

READ, J. C. 1963. Rectifiers and rectifier applications. *Proc. I.E.E.*, **110**, No. 4, 714–738.

مسائل

1 - احسب من المبادىء الاساسية ، متوسط الفولتيات الخارجة في حالتي اللاحمل والحمل - الكلي لمقوم سداسي الانود . حيث تكون زاوية التداخل في حالة الحمل الكلي 30°. وذروة الفولتية لكل طور ثانوي هي 300 ف . افرض ان هبوط القوس ثابتا ومقداره 20 ف .

(الجواب : 267 ف . 248 ف)

2 . في مقوم ثلاثي الانود تكون المفاعلة التسربية لكل طور 0·38 أوم . و ج.م.ت لفولتية الثانوي 390 ف والتيار الخارج (بعد ترشيحه بصورة تامة) 220 أمبير. اهمل جميع المفاقيد في المحول والمقوم . واشتق أياً من المعادلات اللازمة . احسب زاوية التداخـل بين تيارات الانود . احسب ايضا الفولتية الخارجة .

(الجواب : 34·4° . 416 ف)

3 . يحمل كل قلب فرع في محول ثلاثي الطور ملفا له مائة لفة وملفاً ثانوياً بمأخذ مركزي ذا 160 لفة كلية . ربطت ملفات الابتدائي الثلاثة بشكل مثلثي وغذيت من مصدر ثلاثي الطور . 50 هرتز فولتية 415 ف (فولتية خط) . وربطت المآخذ المركزية للملفات الثانويـة سوية . بينما ربطت النهايات الست للملفات الى ستة انودات لمقوم قوس زئبقي ..

اما فقد الحديد للمحول فهو 40 واط . ومقاومة الابتدائي لكل طور هي 0·16 أوم . ومقاومة الثانوي مقاسة بين انود واحد والمأخذ المركزي فهي 0·05 أوم . فاذا كان المقوم يشتغل بتيار خرج ثابت مقداره 30 أمبير . وبفولتية قوس مقدارها 20 فولت وكانت زاوية تأخير الشبكة 60°, فاحسب من المبادىء الاساسية (باهمال التداخل) . (أ) متوسط الفولتية الخارجة . (ب) ج.م.ت لتيار الانود . وكذلك (ج) الكفاءة الكلية .

(الجواب : 204·1 ف . 12·25 أمبير . 89·33%)

4 . مجهز التيار المستمر لمقوم عكسي ذي قوس زئبقي هو 200 أمبير عند 480 ف . ربطت الانودات الستة الى ست نقاط تفرع نجمي لملفات ابتدائي محول . تحتث في كل ملف منها ق.د.ك وتتحول هذه من خلال ثانوي المحول الى منظومة متوازنة ثلاثية الطور .

افرض ان التيار المستمر يكون مستقراً . واخماد القوس يحدث بعد °15 من النقاط الصفرية المتتابعة للفولتية المتناوبة . ارسم صيغ الموجات للفولتية والتيار لأنود واحد . جـد ج.م.ت ال ق.د .ك للمحول في احد ملفات الانود وعامل الاستخدام على جانب الابتدائي السداسي الطور للمحول . اهمل جميع هبوط الفولتيات الداخلية .

(الجواب : 503 ف . 0.39)

5. ربط كل طور من ثانوي محول سداسي الطور الى جهاز تحويل ذي قوس زئبقي له فولتية ج.م.ت مقدارها 300 ف . ويمكن لجهاز التحويل ان يعمل (أ) مقوماً وكذلك (ب) مقوماً عكسياً . وفي كلتا الحالتين ومع هبوط قوس ثابت مقداره 20 ف يمكن اهمال تيار حمل صغير في التداخل وكذلك هبوط الفولتيات في الممانعات .

اذا اشتغل جهاز التحويل مقوماً (أ) تكون الفولتية المستمرة الخارجة هي 310 ف (معدل قيمتها) . ومقوماً عكسياً (ب) يجهز من مصدر تيار مستمر ذي فولتية 400 ف له محاثة دائرة مهملة . والتوصيل يكون غير مستمر وكل انود يوصل خلال $\frac{1}{8}$ من الفترة (°45) . احسب من المبادىء الاساسية الفرق في زاوية تأخير الشبكة بين الحالتين (أ) و (ب) .

(الجواب : °30 °103)

6. جهاز تحويل ذو قوس زئبقي ثلاثي الانود مغذى من مصدر ثلاثي الطور فولتيته 415 ف من خلال محول مثلثي / نجمي رافع له نسبة لفات لكل طور مقدارها 2 : 1 . ويعمل الجهاز مقوماً عكسياً بزاوية تأخير شبكة قدرها °170 (مقاسة من نقطة التبديل الطبيعي اذا أشتغل الجهاز مقوماً) . وله هبوط فولتية قوس مقدارها 20 فولت . ومابين نهاية انسياب التيار في احد الانودات وبداية انسياب التيار في الانود القادم الاخر ، تكون هناك فترة عدم توصيل مناظرة لزاوية مقدارها °80 . فاذا كانت محاثة الدائرة مهملة ، فاحسب فولتية مصدر التيار المستمر . بين ايا من الافتراضات التي يتم وضعها للحصول على حل لهذا السؤال .

(الجواب : 1037)

الفَصلُ السَابعْ

مصفوفات الشبكات الثلاثية الطور وتحويلات انظمة الاحداثيات

3-PHASE NETWORK MATRICES AND CO-ORDINATE SYSTEM TRANSFORMATIONS

7.1 مقدمة

لقد تطرقت الفصول السابقة من هذا الـكتاب وكذلك فصول الجزء الاول منه الى الهيئة الاساسية لمنظومات القدرة بوصفها صنفاً خاصاً من الاجهزة . تمثلت بمبادىء حساب تيارات العطل في المنظومة او حماية جزء من المنظومة ضد التيارات المفـرطـة او الفولتيات المفرطة وكذلك اجتناب فقدان التزامن . ان هذا الفصل وكذلك الفصل الذي يليه يتطرقان الى المبادىء المتضمنة في طرق التبسيط والتقليص لاجراءات روتينية منظمة باستغلال الحاسب الرقمـي الالـكتروني للمعادلات الخطية الآنية المتعددة المتضمنة في جزء كبير من منظومة قدرة تؤدي اجهزتها المتباعدة عامة دورها مجتمعة وبصورة آنية .

وقد تكوّن هذه المعادلات لسريان الحمل الطبيعـي في المنظومة (راجع الفقرة 8.4) . أو تلك الخاصة بالاعطال غير المتزامنة (راجع الفصل 1 من الجزء الاول . والفقرة 7.6 من هذا الـكتاب) . أو المعادلات المنسوبة الى الاستقرارية العابرة للمنظومة (راجع الفصل 3) .

قد تتحقق الحسابات المنتظمة للتيارات والفولتيات في الدوائر الـكهربائية عنـد استخدام الحاسب الالـكترونـي وبفائدة أكثر وذلك بتمثيل المعادلات الخطيـة الانية بصيغة مصفوفة مع كون هذه المتغيرات معبراً عنها بمنظومة من منظومات الاحداثيات المتعددة . ان من اكثر النظم الرياضية شيوعاً في حسابات منظومة القدرة معادلات تيارات الشبكة (الفقرة 8.2) . ومعادلات فولتيات العقد (الفقرة 8.3) وعندما تحدث

حالة عدم التوازن في الدوائر الثلاثية الطور فان التيارات والفولتيات قد يتم تمثيلها بمركباتها المتماثلة (الفصل 8 من الجزء الاول) . هناك نظام بديل للمركبات المتماثلة هذه والتي تستخدم بصورة خاصة لاغراض معينة ومتخصصة في الدوائر غير المتوازنة الثلاثية الطور الا وهي مركبات α ، β وصفر (Clarke, 1943, . والفقرة 7.8) .

وعندما لايكون بالامكان اهمال الفروقات الصغيرة بين محاور الاقطاب الرئيسية ومحاور الاقطاب البينية للماكنة التزامنية ذات الدوار الاسطواني أو الفروقات الكبيرة في الماكنة ذات القطب البارز . فان التيارات والفولتيات للاطوار الثلاثة يمكن تحويلها الى مركبات في المحور المباشر والمحور التعامدي (الجزء الاول . الفصل 7 وكذلك الفقرة 7.7 من هذا الكتاب) .

ان هذه كلها امثلة على استخدام المتغيرات البديلة عن تيارات وفولتيات الطور الحقيقية وغرضها الاساسي هو تبسيط وتنظيم الحسابات . والوسيلة التي تترابط فيها فروع منفردة اودوائر منفصلة لتشكل دائرة ماتكون فيها التيارات معرفة حول الشبيكات . او تكون فيها جهود العقد جميعا معرفة بالنسبة لعقدة اساسية (مرجع) واحدة . يمكن ان تحدد بوساطة مصفوفة تحويل تدعى بمصفوفة الربط (راجع الفقرة 8.2 وكذلك الفقرة 8.3 على التوالي) . ويمكن تحويل مجموعة ثلاثية الطور من التيارات او الفولتيات الى مجموعتها المناظرة من المركبات المتماثلة باستخدام مصفوفة تحويل (راجع الفقرة 7.6) بحيث يتم بالفعل الحصول على دائرة بديلة . ولغرض ايجاد التيارات والفولتيات في شبكة كبيرة مثل منظومة قدرة ثلاثية الطور . يتم اولا تأمل دائرة بسيطة جدا تعرف بالشبكة البدائية . حيث يمكن ايجاد معادلاتها مباشرة . بعد ذلك يتم ربط التيارات والفولتيات في الشبكة البدائية هذه والتي سوف يتم ترميزها هنا بالاشارة (′) . اي I' و V' مثلا . بوساطة مصفوفة ربط او تحويل . لذلك فان لكل من منظومات الاحداثيات المذكورة اعلاه شبكة بدائية : للتيارات الشبيكية تكون الشبكة البدائية لها عبارة عن فروع الشبكة منفصلة عن بعضها وتكون مقصورة الدائرة (انظر الشكل 8.1 (ج)) . اما لفولتيات العقد فتكون الشبكة البدائية عبارة عن فروع الشبكة منفصلة عن بعضها وتكون مفتوحة الدائرة . كل منها مع تيار عقدتها المسلط . (انظر الشكل 8.3 (ب)) . اما الشبكة البدائية للمركبات المتماثلة فهي عبارة عن شبكات التتابع الموجب والسالب والصفري التي تربط تيارات التتابع مع فولتيات الطور المرجع . (راجع الفصل 8 من الجزء الاول) . وللمكائن الكهربائية الدوارة فان الشبكة البدائية او الماكنة البدائية هي تلك التي توجد

فيهاملفات ساكنة موضوعة في الفراغ على محورين متعامدين هما المحور المباشر والمحور التعامدي حيث تحدث في هذه الملفات قوى دافعة كهربائية دوارة ومتحولة .

في هذا الفصل اشتقت العلاقات المتضمنة في هذه التحويلات قبل الشروع بتطبيق الفولتيات العقدية في الفصل 8. (وكذلك تيارات الشبيكات) على الحل المنتظم باستخدام الحاسب الالـكتروني لمعادلات سريان الحمل في منظومة قدرة . ان من اهم التحديدات الشائعة للربط بين التيارات والفولتيات في منظومة القدرة الى تلك التي في المنظومة البدائية هي ان تكون القدرة في كل منهما متساوية . والتي تعرف بـ « القدرة اللامتغيرة » . وهـذا الشرط هو الاكثر منطقية . وقد يوحي لاول وهلة انه الشرط الوحيد الذي يستوجـب . استخدامه في هذه الحالة ، لـكنه سوف يتبين في الفقرتين 7.5 و 7.6 ان الفائـدة المتوخاة من عمل مصفوفة تحويل واحدة للفولتيات والتيارات كليهما . واستخدام عامل ضرب مقداره واحد قد ادى الى امكانية تطبيق تحويل المركبات المتماثلة بصورة عامـة اكثربدون استخدام نهج القدرة اللامتغيرة ويبدأ هذا الفصل بتطبيق نهج القدرة اللامتغيرة على تحويلات تيارات الشبكة وفولتيات العقد . وباستخدام النتائج المحصل عليها من حالة تيـار الشبكة . تدرس دائرة ثلاثية الطور لها ممانعات تبادلية غير متوازنة ، بين اطوار، وممانعات ذاتيةغير متوازنة في الاطوار ذاتها . وعندما تكون كل مجموعة من هـــذه الممانعات متوازنة . يتم الحصول آنئذ على طورمكافيء لتمثيل هذه الدائرة . ويعلل استخدام تمثيل الطور المفرد من دائرة متوازنة ثلاثية الطور بدون الادخال الضمني للممانعة التبادلية وذلك بعد هذه الممانعة جزء من الممانعة الذاتية المؤثرة ، كما جرى هذا في الجزء الاول من هذا الـكتاب . وبعد ان تم في الفترة 7.4 اعطاء الحالة الخاصة في كون تحويـــل الفولتية ليس مرتبطا مع تحويل التيارفي حالة مثل حالة القدرة اللا متغيرة . تتطرق الفقرة القادمة الى مصفوفة تحويل المركبات المتماثلة والتي تكون هي نفسها للفولتيات والتيارات كليهما . حيث بين انه ان لم تستخدم قيمة خاصة لعامل الضرب (وهذه ليست هي الحالة فـي العموم) . فان القدرة لاتكون « لامتغيرة » بين منظومة القدرة وشبكات التتابـــع للمركبات المتماثلة . لقد أوضحت طرق استخدام المصفوفات . وبصورة اكمل من تلك الطرق التي تم اجراؤها في الفقرة 8.3.2 من الجزء الاول . الظروف المطلوبة لعدم وجود اقترا ن متبادل بين شبكات التتابع نفسها . اخيراً وفي هذا الفصل اعطيت العلاقات الخاصة بالتحويلات الى محاور العضو الدوار الثابتة في ماكنة تزامنية . وكذلك لمركبات الفا وبيتا وصفر والتي تعرف احياناً بمركبات « كلارك » .

7·2 اجراء التحويلات مع عدم تغير القدرة

Trans formanions with invariance of power

ان المتجهات العمودية (انظر الملحق م 1·1) للتيارات والفولتيات لشبكة بدائية يتم ترميزها بـ [I′] و [V′] . بينما تكون المتجهات العمودية الحقيقية المراد دراستها هي [I] و [V] . وقد تربط تيارات الشبكة البدائية الى التيارات المنظومة الحقيقية بوساطة مصفوفة رابطة [C] .

$$[I'] = [C][I] \qquad [7\cdot1]$$

اما في المنظومة البدائية فان الفولتيات سوف تكون مربوطة الى التيارات بوساطة مصفوفة ممانعة مربعة [Z′] .

$$[V^*] = [Z^*][I^*] \qquad [7\cdot2]$$

وبالاسلوب نفسه فان الفولتيات والتيارات في المنظومة الحقيقية تكون مرتبطة بوساطة مصفوفة مربعة للممانعة [Z] .

$$[V] = [Z][I] \qquad [7.3]$$

ولاتعطي [7.3] اية معلومات عن نظام الاحداثيات المستخدم . حيث انها قد تكون . على سبيل المثال . الصيغة العامة للمعادلة [8.2] . والتي فيها يستخدم تيار الشبكة حيث تكون [Z] عبارة عن مصفوفة ممانعة الشبكة . اوانها قد تمثل المعادلة [8.32] وفي مثل هذه الحالة تكون المعادلات مكتوبة بصيغة الفولتية العقدية وتكون [Z] عبارة عن مصفوفة ممانعة عقدية .

ان التحديدات المطبقة وبصورة متكررة في ربط التيارات والفولتيات للمنظومة الحقيقية الى تلك التيارات والفولتيات في المنظومة البدائية تنص على ان القدرة المركبة في كل منظومة تكون متساوية . وفي اي فرع يحمل تيار **I** وله فرق جهد عبر اطرافه **V** . تكون القدرة المركبة S فيه كما اشير اليها سلفا . (انظر الملحق 4 من الجزاء الاول) كالاتي

$$S = P + jQ = \mathbf{VI}^*$$

لما كانت [V], [I], [V′] وكذلك [I′] جميعها متجهات عمودية . فان كل واحد من هذه المجموعة يجب جعلها منقولة لتؤلف متجها سطريا قبل اجراء اية عملية من عمليات الضرب . لذلك فان شرط القدرة اللا متغيرة يعطي

$$[V']_t[I'^*] = [V]_t[I^*] \qquad [7.4]$$

وبالتعويض عن [I'^*] في المعادلة [7.4] والذي تم الحصول عليه من [7.1] ينتج

$$[V']_t[C^*][I^*] = [V]_t[I^*]$$

$$([V']_t[C^*] - [V]_t)[I^*] = 0$$

بما أن [I^*] لايساوي صفراً فان $([V']_t[C^*] - [V]_t) = 0$ اما أن تساوي صفراً أويكون حاصل ضربها مع [I^*] يساوي صفراً . ان الافتراض الاخيرهذا غيرمعقول لمجموعة التيارات [I^*] غيرالمعتمدة على بعضها خطياً . (Bandyopadhyay, 1969) . لذلك تكون

$$[V']_t[C^*] = [V]_t$$

وهذه المعادلة لم تأت مباشرة من تلك المعادلة التي تلت [7.4] ذلك لان [I^*] مصفوفة انفرادية بحيث يكون معكوسها غير موجود ولذلك فان « حذف » [I^*] من كلا جانبي المعادلة لايسمح به باجراء عملية المنقولة . (انظر الملحق أ . 1.5.1) ينتج

$$[V] = [C^*]_t[V'] \qquad [7.5]$$

وتعبر [7.5] عن المستلزمات التي يضعها شرط القدرة المركبة اللامتغيرة على العلاقة مابين الفولتيات في المنظومة الحقيقية والمنظومة البدائية عندما تربط علاقات التيارات من خلال [7.1] . ان المعادلة [8.5 (أ)]مثال على تطبيق [7.5] حيث تطبق على تحليلات تيار الشبكة في مثل هذه الحالة الخاصة .

يمكن الان ايجاد العلاقة بين مصفوفة الممانعة للشبكة الحقيقية المعطاة بنظام احداثيات خاص ، ومصفوفة الممانعة للشبكة البدائية وذلك بجمع [7.3] و [7.5] حيث يعطي هذا

$$[V] = [Z][I] = [C^*]_t[V']$$

بالتعويض عن [7.2] و [7.1] ينتج حينئذ

$$[Z][I] = [C^*]_t[Z'][C][I]$$

بحيث ان

$$[Z] = [C^*]_t[Z'][C] \qquad [7.6]$$

7.2.1 تطبيق التحويلات للتيارات الشبيكية APPLICATION TO MESH CURRENTS

في الفقرة الثانية من الفصل القادم سيتم ترميز الفولتيات والتيارات للفروع المنفصلة للمنظومة البدائية بالرمزين [e] و[i] ، حيث تكون مناظرة لـ [V'] و[I'] التي يجري استعمالها حالياً ، وكذلك تناظر [E] ، وهي الفولتيات الشبيكية العاملة في المنظومة الحقيقية ، [V] . على هذا الاساس فان المعادلات التي تناظر هذه القيم هي [7.1] و

[8.3] ، وكذلك [7.5] و[8.5 (أ)] و[7.6] و[8.10] . المصفوفة [Z] للمعادلتين الاخيرتين من هذه المعادلات تعرف باسم مصفوفة الممانعة الشبيكية للشبكة .

7.2.2 تطبيق التحويلات للفولتيات العقدية

APPLICATION TO NODAL VOLTAGES

اذا تم التعبير عن العلاقات التي بين مجموعات من التيارات والفولتيات بدلالة المسامحات ، كما تم ذلك في معادلات الفولتية العقدية ، فبدلاً من [7.2] و[7.3] سوف يظهر مايأتي

$$[I'] = [Y'][V'] \qquad [7.7]$$

$$[I] = [Y][V] \qquad [7.8]$$

واذا تم تطبيق مستلزمة القدرة اللامتغيرة مرة اخرى باستعمال [7.4], مع ربط الفولتيات في هذه الحالة بالمعادلة

$$[V'] = [C][V] \qquad [7.9]$$

بدلاً من معادلة علاقة التيار [7.1], ، وبالتعويض كما مر سابقاً ينتج

$$[I] = [C^*]_t[I'] \qquad [7.10]$$

وكذلك

$$[Y] = [C^*]_t[Y'][C] \qquad [7.11]$$

وهاتان المعادلتان الاخيرتان تكونان مناظرتين لـ [8.17] و [8.21] الواردتين في الفقرة 8.3 من الفصل القادم . وتعرف [Y] بمصفوفة مسامحة العقد للشبكة .

7.3 تطبيق مصفوفات ربط تيار الشبيكة الى شبكات ثلاثية الطور

Mesh current connection matrices applied to a 3-phase network

بالاضافة الى الممانعات الذاتية المبينة في الشبكة الثلاثية الطور الموضحة في الشكل 7.1 ، توجد ممانعات تبادلية

$$z_{ab} \quad z_{bc} \quad z_{ca} \quad z_{an} \quad z_{bn} \quad \text{and} \quad z_{cn}$$
$$z_{ba} \quad z_{cb} \quad z_{ac} \quad z_{na} \quad z_{nb} \quad \text{and} \quad z_{nc}$$

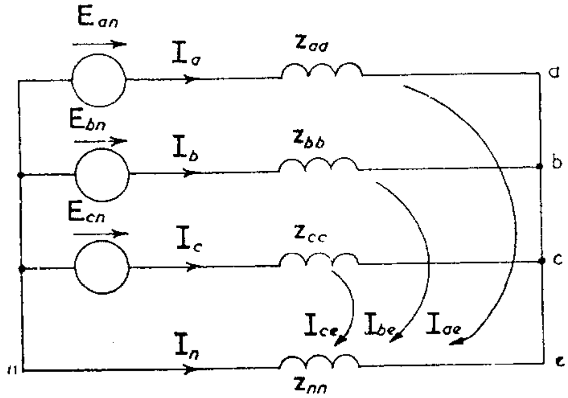
في اجهزة المنظومة نفسها . وفي الحالة العامة فان الممانعات التبادلية هذه قد تكون غير متوازنة بحيث ان $z_{ab} \neq z_{bc}$ وهلم جراً . وكذلك $z_{an} \neq z_{bn}$ والخ . وتكون ايضاً لامتعاكسة بحيث ان $z_{ab} \neq z_{ba}$ الخ . وعلى اية حال فان الدائرة المكافئة البسيطة في الشكل [7.1] لها تمثيل محدود في كونها تطبق على منظومة حاوية على اجهزة ستاتيكية فقط . أو تطبق لمنظومة تحتوي على مكائن تزامنية بعد حدوث عطل فيها ولفترة لاتتجاوز زمن دورة واحدة أو دورتين بالتقريب (انظر الفقرة 7.6.2) . ويرجع هذا الى كونها لاتشتمل على اي تفاعلات ضمنية متغيرة زمنياً مع دوائر مجال المكائن التزامنية في المنظومة . بحيث ان اية دائرة تحتوي على مجموعة من الممانعات لماكنة يمكن ان تطبق لتتابع واحد ولحالة معينة من نظام الزمن فقط * . اي يمكنها ان تحتوي على قيم الحالة المستقرة لممانعات التتابع الموجب لجميع الاجهزة . ولظروف التتابع الموجب الابتدائية يمكن ان تتغير ممانعات الماكنة الى القيم دون العابرة أوالعابرة . كما يتوجب ان تتغير هذه الممانعات مرة اخرى لحالات التتابع السالب (راجع الفصل 7 من الجزء الاول) .

لقد افترض مبدئياً عدم وجود توافقيات في تيارات وفولتيات الدوائر . وان ج . م . ت تيارات الفروع الأربعة تكون كما يلي I_a, I_b, I_c وكذلك I_n، وترتبط تيارات الفروع هذه مع ج . م . ت تيارات الشبيكة I_{ae}, I_{be} و I_{ce} بوساطة مصفوفة ربط شبيكية [C] حيث ان

---

* يقصد بنظام الزمن الحالة العابرة او المستقرة

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$



. الشكل 7.1. تيارات الشبيكة في منظومة ثلاثية الطور .

ومن [7.6] تعطى مصفوفة الممانعة للشبيكة كالآتي :

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{C}^*]_t[\mathbf{z}][\mathbf{C}]$$

حيث ان مصفوفة ممانعة الفرع [z] هي

$$[\mathbf{z}] = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{aa} & \mathbf{z}_{ab} & \mathbf{z}_{ac} & \mathbf{z}_{an} \\ \mathbf{z}_{ba} & \mathbf{z}_{bb} & \mathbf{z}_{bc} & \mathbf{z}_{bn} \\ \mathbf{z}_{ca} & \mathbf{z}_{cb} & \mathbf{z}_{cc} & \mathbf{z}_{cn} \\ \mathbf{z}_{na} & \mathbf{z}_{nb} & \mathbf{z}_{nc} & \mathbf{z}_{nn} \end{bmatrix} \qquad [7.12]$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} (Z_{aa}-Z_{na}-Z_{an}+Z_{nn}) & (Z_{ab}-Z_{an}-Z_{nb}+Z_{nn}) & (Z_{ac}-Z_{an}-Z_{nc}+Z_{nn}) \\ (Z_{ba}-Z_{bn}-Z_{na}+Z_{nn}) & (Z_{bb}-Z_{bn}-Z_{nb}+Z_{nn}) & (Z_{bc}-Z_{bn}-Z_{nc}+Z_{nn}) \\ (Z_{ca}-Z_{cn}-Z_{na}+Z_{nn}) & (Z_{cb}-Z_{cn}-Z_{nb}+Z_{nn}) & (Z_{cc}-Z_{cn}-Z_{nc}+Z_{nn}) \end{bmatrix} \quad [7.13a]$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad [7.13b]$$

ستستخدم [7.13] في البند القادم لغرض اختبار تأثير ادخال التوازن في المنظومة .

7.3.1 تمثيل الطور الأحادي لشبكة متوازنة ثلاثية الطور .

SINGLE-PHASE REPRESENTATION OF A BALANCED 3-PHASE NETWORK

لقد فرض عموماً في تحليل منظومة قدرة ان الممانعات الذاتية والمتبادلة للمكائن والمحولات تكون متوازنة للأطوار الثلاثة كلها . واذا كان التباعد غير المتساوي بين طور وطور وكذلك بين الطور والأرض في خط نقل طويل كافياً بحيث يسبب عدم توازن ملحوظ في قيم هذه الممانعات . فان الموصلات قد يتم استبدال مواضعها بحيث تعيد خاصية التوازن الى هذه الممانعات مرة اخرى (راجع الفصلين 2 و3 من الجزء الأول) .

سوف تتم مناقشة حالة حدوث عطل غير متوازن على المنظومة المبينة في الشكل 7.1 والتي تمثل الشبكة لحد الأطراف c, b, a وكذلك e في فقرة لاحقة من هذا الفصل . حيث تكون ممانعات هذه المنظومة كالآتي

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc};\ Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca};\ Z_{ba} = Z_{cb} = Z_{ac};$$
$$Z_{an} = Z_{bn} = Z_{cn} = Z_{na} = Z_{nb} = Z_{nc}$$

لهذه الظروف قد تكتب [7.13] كما يأتي

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}'_m & \mathbf{Z}''_m \\ \mathbf{Z}''_m & \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}'_m \\ \mathbf{Z}'_m & \mathbf{Z}''_m & \mathbf{Z}_p \end{bmatrix} \qquad [7.14]$$

حيث

$$\mathbf{Z}_p = \mathbf{z}_{aa} - 2\mathbf{z}_{an} + \mathbf{z}_{nn}$$

$$\mathbf{Z}'_m = \mathbf{z}_{ab} - 2\mathbf{z}_{an} + \mathbf{z}_{nn}$$

$$\mathbf{Z}''_m = \mathbf{z}_{ba} - 2\mathbf{z}_{an} + \mathbf{z}_{nn}$$

واذا كانت تيارات وفولتيات المنظومة المبينة في الشكل 7.1 متو ازنة بحيث ان تتابعها يكون موجباً فقط . فباستخدام العامل المدور h الذي تمت مناقشته في الملحق 3 من الجزء الاول سوية مع [*7.14*] نحصل على العلاقة التالية

$$\mathbf{E}_{an1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathrm{h}^2 \\ \mathrm{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}'_m & \mathbf{Z}''_m \\ \mathbf{Z}''_m & \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}'_m \\ \mathbf{Z}'_m & \mathbf{Z}''_m & \mathbf{Z}_p \end{bmatrix} \mathbf{I}_{ae1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathrm{h}^2 \\ \mathrm{h} \end{bmatrix}$$

وتكون $\mathbf{E}_{an1}$ مساوية لـ $\mathbf{E}_{an}$ ذلك لأن $\mathbf{E}_{an2} = \mathbf{E}_{an0} = 0,$. بالأسلوب نفسه يكون $\mathbf{I}_{ae1}$ مساويا لـ $\mathbf{I}_a$.

$$\mathbf{E}_{an} = \mathbf{I}_a(\mathbf{Z}_p + \mathrm{h}^2\mathbf{Z}'_m + \mathrm{h}\mathbf{Z}''_m)$$

بالتعويض عن قيم الممانعة من *[7.14]* في هذه النتيجة ينتج

$$\mathbf{E}_{an} = \mathbf{I}_a(\mathbf{z}_{aa} + \mathrm{h}^2\mathbf{z}_{ab} + \mathrm{h}\mathbf{z}_{ba}) \qquad [7.15]$$

وفي معظم الحالات تكون المحاثات التبادلية متعاكسة (أي $(M_{ab} = M_{ba}$ بالفرض وبدون أية مناقشة . وكما ان هذه تكون صحيحة دائمة للشبكات الهامدة فان دراسات الطاقة تبين ان هذه الفرضية تتحقق فعلاً في ظروف ماكنة مثالية غير مشبعة . وليس من الضروري ان يتحقق التعاكس هذا في ماكنة حقيقية ذات قلب حديد .

لكن التجارب قد أثبتت أنه في حالة تظهير ظروف التشبع بدقة كافية فان الفرق بين مجموعتي المحاثات التبادلية هذه يكون صغيراً جداً حتى وانقيست مابين ملف موزع بصورة منتظمة أو ملف متضام (Jones, 1958) . لذا ، يمكن الفرض بصورة عامة ان $z_{ab} = z_{ba}$ الخ بحيث ان

$$E_{an} = I_a(z_{aa} - z_{ab}) \qquad [7.16]$$

لذلك ففي دائرة متوازنة ثلاثية الطور تكون الممانعة الذاتية المؤثرة لكل طور عبارة عن ممانعة التوالي لذلك الطور ناقصاً الممانعة التبادلية بين الأطوار نفسها .

7.4 التحويل العام : General transformation

لقد تم في الفقرة 7.2 الأشارة الى أنه اذا كانت التيارات في المنظومات الحقيقية والمنظومات البدائية مرتبطة بعضها ببعض بوساطة مصفوفة الربط [C] في طريقة تيارات الشبيكة ، فان الفولتيات تكون مرتبطة بالمصفوفة $[C^*]_t$ عندما تكون القدرة هي نفسها في كلتا المنظومتين . وان لم يتحقق هذا الشرط فعندئذ قد ترتبط الفولتيات بالمصفوفة [B] بصورة عامة . وهذه المصفوفة قد تكون مربوطة الى المصفوفة [C] أو لا .

واذا ضربت كل من [7.5] و [7.10] مسبقاً بـ $[C^*]_t^{-1}$ فانهما يصبحان للتيارات الشبيكية

$$[V'] = [C^*]_t^{-1}[V] \qquad [7.17]$$

وللفولتيات العقدية

$$[I'] = [C^*]_t^{-1}[I] \qquad [7.18]$$

بمقارنة هذه المعادلات مع [7.1] و [7.9] على التوالي يتبين أنه من الممكن كتابة [7.17] و [7.18] عندما تكون [C] مصفوفة مربعة فقط .

وتمثل العلاقات المستخرجة في الفقرة 7.2 الحالة الخاصة لقدرة لامتغيرة بين منظومتين فقط ، في حين ان الصيغة العامة للمعادلة [7.5] للحالة التي تكون فيها التيارات مرتبطة بوساطة [7.1] هي

$$[V] = [B][V'] \qquad [7.19]$$

وبالأسلوب نفسه. للحالة التي ترتبط فيها فولتيات العقد بوساطة [7.9] قد تكتب علاقة التيار بصورة عامة كالآتي :

$$[I] = [D][I'] \qquad [7.20]$$

ويكون ذلك بديلاً عن الحالة الخاصة للمعادلة [7.10]. وتصبح الصيغة العامـة للمعادلة [7.6] كالآتي

$$[Z] = [B][Z'][C] \qquad [7.21]$$

بالأسلوب نفسه تصبح الصيغة العامة لمصفوفة مسامحة العقد للمعادلـة [7.11] كما يلي

$$[Y] = [D][Y'][C] \qquad [7.22]$$

عملياً سوف تربط كل من [B] أو [D] الى [C] بشرط معين وهو شرط القدرة اللامتغيرة ، أما في الفقرة القادمة فسيتم فرض بعض التبعات التي تتعدى شرط القدرة اللامتغيرة هذا

7.5 مصفوفات التحويل المتساوية للتيارات والفولتيات والتحويلات المتعامدة .

Equal transformation matrices for currents and voltages and orthogonal transformations

الى جانب الحالة الخاصة للقدرة اللامتغيرة توجد حالة أخرى حيث تستخدم فيها المصفوفة [T] نفسها للتيارات والفولتيات كليهما

$$[I'] = [T][I] \qquad [7.23]$$

$$[V'] = [T][V] \qquad [7.24]$$

اضافة الى هذا التحديد في استخدام المصفوفة نفسها التيارات والفولتيات كليهما

واذا فرض شرط القدرة اللامتغيرة الى جانب هذا التحديد في جعل المصفوفة نفسها للتيارات والفولتية ، شريطة ان تكون المصفوفة [T] مربعة (اي ان التحويل بيـــن المنظومتين له عدد الأبعاد نفسه) ، فبمقارنة كل من [7.23] و [7.24] مع [7.1] و [7.17] يتبين مايلي

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{T}^*]_t^{-1} \qquad [7.25]$$

أو ان

$$[\mathbf{T}]^{-1} = [\mathbf{T}^*]_t \qquad [7.26]$$

والتي تشير الى ان [T] هي مصفوفة متعامدة (انظر الملحق م. 1.9.1) . بضرب كلا طرفي [7.26] بالمصفوفة [T] مسبقاً ينتج

$$[\mathbf{T}][\mathbf{T}^*]_t = [\mathbf{U}] \qquad [7.27]$$

حيث ان [U] هو مصفوفة احادية . وبما ان المحدد $|T|$ للمصفوفة [T] لايتغير باستبدال الأسطر والأعمدة ، فان

$$|T| \times |T^*| = 1 \qquad [7.28]$$

في بعض الحالات مثل مصفوفة تحويل المركبات المتماثلة $[\mathbf{T}_s]$, . يتحقق شرط المصفوفة الواحدة للتيارات والفولتيات كليهما ولكن شرط القدرة اللامتغيرة قد لايتحقق الا ان هذه الشرط الأخير يمكن تحقيقه اذا ضربت المصفوفة بالعامل k, فقط . هذا يعني أنه اذا كانت $[\mathbf{T}] = k[\mathbf{T}_s]$ فعندئذ تصبح [7.26] كما يلي

$$(1/k)[\mathbf{T}_s]^{-1} = k[\mathbf{T}_s^*]_t$$

بحيـــث يكـــون

$$k^2[\mathbf{T}_s][\mathbf{T}_s^*]_t = [\mathbf{U}]$$

كذلك اذا كانت $[\mathbf{T}_s]$ مصفوفة مربعة لها عدد n من الاسطر وعدد مماثل n من الاعمدة عندئذ تبـــدل [7.28] بما يـــلي

$$k^{2n}|T_s| \times |T_s^*| = 1$$

ومنها يعطى العامل k كالآتـــي

$$k = \frac{1}{{}^{2n}\sqrt{(|T_s| \times |T_s^*|)}} \qquad [7.29]$$

ان قيمة هذا العامل تم تقديرها في الفقرة القادمة . وقد تم بيان ان طريقة المركبات المتماثلة يمكن ان تطبق . وهذا هو المعتاد . بجعل العامل k مساوياً لواحد $k = 1,$ لكن هذا لايحقق شرط القـدرة اللامتغيرة .

7.6 مصفوفة تحويل المركبات المتماثلة :

Symmetrical component transformation matrix

بعد التعرف على قيمة العامل k في $[7.29],$. سيتم في هذا الفصل الحصول على العلاقة بين مصفوفات الممانعات الشبيكية للمركبات المتماثلة والمصفوفات المناظرة لها في المنظومة الحقيقية . في البندين القادمين تم تطبيق هذه العلاقة لدائرة ثلاثية الطورية غير متوازنة وكذلك لدائرة متوازنة والغرض من ذلك هو لتوضيح حالة عدم وجود اقتران متبادل بين شبكات التتابع الثلاث . أما في الفقرة 7.6.3 فقد تم توضيح التبسيطات التي تنتج عن عطل غيرمتوازن يكون متماثلاً بالنسبة الى الطور المأخوذ مرجعاً . وكذلك تؤشر الفقرة 7.6.4 الى طريق يتم منه التعامل مع منظومة طاقتها تغذى من كلا جانبـي عطل غيـر متـوازن .

وكما قد تم شرحه في الفصل 8 من الجزء الاول . فان فولتيات وتيارات غيرمتوازنة ثلاثية الطورفي دائرة خطية قد تمثل بوساطة جمع ثلاث مجموعات من المركبات المتوازنة . وبأخذ الطور a طوراً مرجعاً تكون قيم ج . م . ت الطورية للقوى الدافعة الكهربائية والتي هي فولتيات السوق في الشبيكات الثلاثة للدائرة المبينة في الشكل 7.1 كما يـــلي :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{an} \\ \mathbf{E}_{bn} \\ \mathbf{E}_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ h^2 & h & 1 \\ h & h^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{an1} \\ \mathbf{E}_{an2} \\ \mathbf{E}_{an0} \end{bmatrix} \qquad [7.30]$$

بالأسلوب نفسه قد تكتب تيارات الشبيكات كما يلي

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ae} \\ \mathbf{I}_{be} \\ \mathbf{I}_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ h^2 & h & 1 \\ h & h^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ae1} \\ \mathbf{I}_{ae2} \\ \mathbf{I}_{ae0} \end{bmatrix} \qquad [7.31]$$

ويمكن ان تكتب هذه المعادلات بالاسلوب التالي

$$[\mathbf{E}] = [\mathbf{T}_s][\mathbf{E}_s] \qquad [7.32]$$

كذلك

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{T}_s][\mathbf{I}_s] \qquad [7.33]$$

حيث قد تدعى $[\mathbf{T}_s]$ بمصفوفة تحويل المركبات المتماثلة .

يمكن ان نرى من [7.29] أنه اذا ماأريد تطبيق المستلزمات من حيث ان القدرة سوف تكون لامتغيرة بين فولتيات وتيارات المنظومة الحقيقية وبين مركباتها المتماثلة ، فهذا يستوجب استعمال $k[\mathbf{T}_s]$ بدلاً من $[\mathbf{T}_s]$ حيث ان

$$k = \frac{1}{\sqrt[6]{(|T_s| \times |T_s^*|)}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad [7.34]$$

(على الطالب ان يتحقق ، اذا رغب في ذلك ، تمريناً على المعالجة اليدوية ، من ان قيمة k هي حقاً تكون $1/\sqrt{3}$.) .

وفي الحقيقة فأنه ليس من الضروري او من المعتاد ان يضرب $[\mathbf{T}_s]$ بالعامل $1/\sqrt{3}$ بحيث يحافظ على ثبوت القدرة في المنظومتين كليهما ، ذلك لأنه قد بين ايجاد تابعات الفولتيات والتيارات في الفصل.8 من الجزء الأول ، حيث عولجت وحللت بعد ذلك لتعطي فولتيات وتيارات المنظومة الحقيقية بالمعادلتين [7.30] و [7.31] . بحيث يتم تطبيق التحويل وبعدها يعكس قبل انجاز حساب القدرة بضرب [7.32] وكذلك [7.33] بالمصفوفة $[\mathbf{T}_s]^{-1}$ مسبقاً ينتج

$$[\mathbf{E}_s] = [\mathbf{T}_s]^{-1}[\mathbf{E}] \qquad [7.35]$$

وكذلك

$$[\mathbf{I}_s] = [\mathbf{T}_s]^{-1}[\mathbf{I}] \qquad [7.36]$$

حيث ان

$$[\mathbf{T}_s]^{-1} = \tfrac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad [7.37]$$

وتربط القوى الدافعة الكهربائية والتيارات الشبيكية بوساطـة مصفوفة ممانعة الشبيكة $[\mathbf{Z}]$

$$[\mathbf{E}] = [\mathbf{Z}][\mathbf{I}] \qquad [7.38]$$

وتربط المركبات المتماثلة للـ ق . د . ك والتيار بوساطة

$$[\mathbf{E}_s] = [\mathbf{Z}_s][\mathbf{I}_s] \qquad [7.39]$$

حيث $[\mathbf{Z}_s]$ هي مصفوفة ممانعة الشبيكة للمركبات المتماثلة . ان *[7.32]* و *[7.36]* يناظران كلا من *[7.19]* و *[7.1]* بحيث أنه من *[7.21]* تربط مصفوفة ممانعة الشبيكة للمنظومة الحقيقية $[\mathbf{Z}]$ (انظر *[7.13]*) الى $[\mathbf{Z}_s]$ بوساطة

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{T}_s][\mathbf{Z}_s][\mathbf{T}_s]^{-1}$$

ويمكن ان تكتب هذه كالآتي

$$[\mathbf{Z}_s] = [\mathbf{T}_s]^{-1}[\mathbf{Z}][\mathbf{T}_s] \qquad [7.40]$$

وهذه النتيجة هي نفسها تماما كما لو تم الحصول عليها اذا طبقنا القدرة اللامتغيرة ذلك لأن العامل k سيظهر على كلا طرفي المعادلة [*7.39*] وبذلك تحذف قيمته

7.6.1 الدائرة العامة غير المتوازنة الثلاثية الطور .
GENERAL UNBALANCED 3-PHASE CIRCUIT

للدائرة المبينة في الشكل 7.1 . تعطـى مصفوفة ممانعة الشبيكة بوساطة *[7.13]* . ومن *[7.13]* و *[7.30]* و *[7.32]* و *[7.37]* وكذلك *[7.40]* تكون مصفوفـة ممانعة الشبيكة للمركبات المتماثلة كالاتـي

$$[Z_s] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{bmatrix} \qquad [7.41]$$

حيث ان

$$Z_{11} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc})+h^2(Z_{ab}+Z_{bc}+Z_{ca})+h(Z_{ba}+Z_{ac}+Z_{cb}))$$

$$Z_{12} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+h^2Z_{bb}+hZ_{cc})+h(Z_{ab}+Z_{ba})+(Z_{bc}+Z_{cb}) + h^2(Z_{ac}+Z_{ca})$$

$$Z_{10} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+hZ_{bb}+h^2Z_{cc})+(Z_{ab}+Z_{ac})+h(Z_{ba}+Z_{bc}) + h^2(Z_{cb}+Z_{ca}))$$

$$Z_{21} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+hZ_{bb}+h^2Z_{cc})+h^2(Z_{ab}+Z_{ba})+(Z_{bc}+Z_{cb}) + h(Z_{ac}+Z_{ca}))$$

$$Z_{22} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc})+h(Z_{ab}+Z_{bc}+Z_{ca})+h^2(Z_{ba}+Z_{ac}+Z_{cb}))$$

$$Z_{20} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+h^2Z_{bb}+hZ_{cc})+(Z_{ab}+Z_{ac})+h^2(Z_{ba}+Z_{bc}) + h(Z_{ca}+Z_{cb}))$$

$$Z_{01} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+h^2Z_{bb}+hZ_{cc})+(Z_{ba}+Z_{ca})+h^2(Z_{ab}+Z_{cb}) + h(Z_{ac}+Z_{bc}))$$

$$Z_{02} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+hZ_{bb}+h^2Z_{cc})+(Z_{ba}+Z_{ca})+h(Z_{ab}+Z_{cb}) + h^2(Z_{bc}+Z_{ac}))$$

$$Z_{00} = \tfrac{1}{3}((Z_{aa}+Z_{bb}+Z_{cc})+(Z_{ab}+Z_{ba})+(Z_{bc}+Z_{cb})+(Z_{ca}+Z_{ac}))$$

وتشيرحقيقة كون الحدود التـي لاتقع ضمن قطر المصفوفة $[Z_s]$ ليست صفراً الى وجود اقتران متبادل بين شبكات التتابعات الثلاث بسبب عدم التوازن في المنظومة الثلاثية الطور . على هذا الاساس لايكون ممكناً تطبيق طريقة المركبات المتماثلة المبينة في الفصل الثامن من الجزء الاول من هذا الـكتاب على دائرة ثلاثية الطور تكون غير غيرمتوازنة قبل نقطة العطل ، ويعود هذا السبب الى ان هذه الطريقة تفرض أن التيارات لاي تتابع من التتابعات الثلاثية لاتنتج فولتيات في اي من التتابعين الاخـــــريـــن .

7.6.2 دائرة ثلاثية الطور متوازنة تماماً لغاية نقطة العطل :

COMPLETELY BALANCED 3-PHASE CIRCUIT UP TO THE POINT OF FAULT

في دائرة ثلاثية الطور متوازنة تماماً لغاية نقطة العطل ، يكون

then $z_{aa} = z_{bb} = z_{cc}$, $z_{ab} = z_{bc} = z_{ca} = z_{ba} = z_{cb} = z_{ac}$ and $z_{an} = z_{na} = z_{bn} = z_{nb} = z_{cn} = z_{nc}$ and وكذلك

$$[Z] = \begin{bmatrix} (z_{aa}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{ab}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{ba}-2z_{an}+z_{nn}) \\ (z_{ba}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{aa}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{ab}-2z_{an}+z_{nn}) \\ (z_{ab}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{ba}-2z_{an}+z_{nn}) & (z_{aa}-2z_{an}+z_{nn}) \end{bmatrix} \quad [7.42]$$

بحيث أن

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}, Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_{ba} = Z_{cb} = Z_{ac}$$

وهذه تبين ان العلاقات نفسها موجودة بين ممانعات الشبكة كما هـي موجودة بين ممانعات الفروع .

وبتعويض هذه الشروط فـي [7.41], ، يمكن ان نتبين انه لاتوجد ممانعات تبادلية بين شبكات التتابع الثلاث وتعليل ذلك هو

$$[Z_s] = \begin{bmatrix} Z_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{00} \end{bmatrix} \quad [7.43]$$

حيث ان

$$\left.\begin{array}{l} Z_{11} = Z_{22} = Z_{aa}-Z_{ab} = z_{aa}-z_{ab} \\ Z_{00} = Z_{aa}+2Z_{ab} \end{array}\right\} \quad [7.44]$$

يتبين مـن ذلـك أن التطبيق الاعتيادي لـطريقـة المركبات المتماثلـة ، مع عدم

وجود اقتران متبادل بين شبكات التتابع الثلاث ، تكون مقتصرة على منظومة ثلاثية الطور لها ممانعات متوازنة بشكل تام الى حد نقطة عطل وفي جميع الاطوار الثلاثة ، ولها أيضاً ممانعات تبادلية متوازنة بصورة تامة .

وللحالات المبينة في .[7.43] هذه ، حيث لاينتج تيار لاي تتابع معين هبوط فولتيات في اي شبكة لتتابع آخر . فان كل قطعة من المعدات في المنظومة تكون لها ممانعة ذاتية الى كل تتابع وكالاتي :

Z_{11} وتكتب Z_1 وتعرف بممانعة التتابع الموجب
Z_{22} وتكتب Z_2 وتعرف بممانعة التتابع السالب
Z_{00} وتكتب Z_0 وتعرف بممانعة التتابع الصفري

والسبب في تساوي قيمتي Z_{11} و Z_{22} في [7.44.] يعود الى عدم شمول الدائرة المبينة في 7.1 على اي تفاعل مع ملفات مجال الماكنة التزامنية كما لوحظ ذلك في الفقرة ,7.3 . لذا فان [7.44] تطبق على دائرة تحتوي على معدات ستاتيكية فقط مع انها تكون صحيحة تقريباً في الظروف الاولية بعد حدوث عطل غير متوازن في منظومة تحتوي على مكائن تزامنية . وسبب ذلك هو ان قيم ممانعات التتابع الموجب والتتابع السالب للماكنة تكون على هذا الاساس متشابهة (راجع الفصل 7 من الجزء الاول) . وصغيرة بحيث ان بقية ممانعات المنظومة تسبب غمر الفرق البسيط بينهما وعندما تحول المنظومة الى شبكات التتابع الثلاث فعندئذ لاتكون هناك اية مشكلة في المساواة بين Z_1 و Z_2 .

عند هذه المرحلة تم التطرق فقط الى منظومة القدرة لغاية نقطة عطل . ولكن لم يتم التطرق الى شمول عطل توازٍ غير متوازن . وهذا النوع من العطل سنطبقه الان عند الاطراف c, b, a وكذلك e في الشكل .7.1 . حيث تكون جهود هذه الاطراف بالنسبة الى الارض

$$\begin{bmatrix} V_{ae} \\ V_{be} \\ V_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{an} \\ E_{bn} \\ E_{cn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ae} \\ I_{be} \\ I_{ce} \end{bmatrix} \quad [7.45]$$

حيث ان ممانعات الشبيكة في [7.45] كانت قد عرفت في [7.13] بدلالة الممانعات الذاتية والتبادلية للفروع والتي تشتمل هنا على اية ممانعة قد تكون عند نقطة عطل غير متوازن ، وقد تكتب [7.45] كما يلي

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{E}]-[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] \qquad [7.46]$$

وبتحويل 7.46 الى مركباتها المتماثلة

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{E}_s]-[\mathbf{Z}_s][\mathbf{I}_s] \qquad [7.47]$$

ولمنظومة القدرة التي تكون متوازنة تماماً لغاية نقطة العطل ، تعطي المركبات المتماثلة لجهد الطور المرجع بالنسبة الى الارض من [7.43] و [7.47] كما يلي

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ae1} \\ \mathbf{V}_{ae2} \\ \mathbf{V}_{ae0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{an1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ae1} \\ \mathbf{I}_{ae2} \\ \mathbf{I}_{ae0} \end{bmatrix} \qquad [7.48]$$

وذلك لأن القوى الدافعة الكهربائية للتتابع السالب والتتابع الصفري لاتتولد في المكائن التزامنية .

المعادلات [7.48] هي في الواقع لمنظومة شبكات تتابع احادية الطور التي يكون الأسلوب الذي تربط فيه هذه الشبكات الأحادية الطور بعضها مع بعض معتمداً على نوع العطل وكما تم بيانه في الفصل 8 من الجزء الأول . بعد ذلك يمكن حل هذه الشبكات المترابطة لأيجاد $\mathbf{I}_{ae2}, \mathbf{I}_{ae1}$ وكذلك $\mathbf{I}_{ae0}$ التي قد تحلل هذه لتعطي تيارات أطوار المنظومة وكذلك ايجاد $\mathbf{V}_{ae2}$ ، $\mathbf{V}_{ae1}$ و $\mathbf{V}_{ae0}$ التي يمكن أن تجمع لتعطي الجهود الى الأرض للأطوار عند نقطة عطل . بالأسلوب نفسه يمكن حساب المركبات المتماثلة للتيار والفولتية عند أية نقطة اخرى بين العطل والمولدات . ان هذه العملية (وهي أكثر مرونة وسهولة من تشكيل مصفوفة ممانعة الشبيكة وعكسها) ، قد تم توضيحها في الجزء الأول لبعض من حالات العطل التي تكون متماثلة بالنسبة الى طور واحد . أما صعوبة تطبيق هذه الطريقة على العطل الذي لايكون متماثلاً بالنسبة الى طور واحد فقد تم توضيحها لحالة بسيطة معينة في الفقرة القادمة .

7.6.3 العطل الذي لايكون متماثلاً بالنسبة الى الطور المرجع :

FAULT WHICH IS ASYMMETRICAL WITH RESPECT TO THE REFERENCE PHASE

ان الطريقة الأعتيادية للمركبات المتماثلة تطبق لحالات محدودة من العطل، كتلك التي يكون العطل فيها متماثلاً بالنسبة الى الطور المرجع a، لكون هذا التحديد يقود الى علاقات أبسط بين التيارات والفولتيات للتتابعات الثلاثة، وهذا يناظر ترابط شبكات التتابع نفسها . أما مباشرة أو بوساطة محولات تيار مثالية نسبتها 1 : 1 ومن غير اية ازاحة طورية (راجع الفصل 8 من الجزء الأول) .

اذا ربط الطور b الى الأرض e في منظومة غير محملة بوساطة ممانعة عطل $\mathbf{Z}_f$، يكون فرق الجهد بين الموصل المعرض للعطل والأرض عند نقطة العطل

$$V_{be} = \mathbf{Z}_f \mathbf{I}_{be} \qquad [7.49]$$

حيث $\mathbf{I}_{be}$ هو التيار المتدفق الى الارض في موصل الطور b. واذا عرف ايضاً $\mathbf{I}_{ae}$ و $\mathbf{I}_{ce}$ بالاسلوب نفسه (كما في الشكل 7.1) للطورين الاخرين فان

$$\mathbf{I}_{ae} = 0 \qquad [7.50]$$

$$\mathbf{I}_{ce} = 0 \qquad [7.51]$$

وبكتابة هذه التيارات والفولتية مجموعاً لمركباتها المتماثلة ينتج

$$\mathrm{h}^2\mathbf{V}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = \mathbf{Z}_f(\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}) \qquad [7.52]$$

$$\mathbf{I}_{ae1} + \mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0} = 0 \qquad [7.53]$$

$$\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0} = 0 \qquad [7.54]$$

من [7.53]

$$\mathbf{I}_{ae0} = -\mathbf{I}_{ae1} - \mathbf{I}_{ae2}$$

بتعويض هذه النتيجة في [7.54] ينتج

$$(\mathrm{h}-1)\mathbf{I}_{ae1} + (\mathrm{h}^2-1)\mathbf{I}_{ae2} = 0$$

بحيث ان

$$\mathbf{I}_{ae2} = \frac{(\mathrm{h}-1)}{(1-\mathrm{h}^2)}\mathbf{I}_{ae1} = \mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1} \qquad [7.55]$$

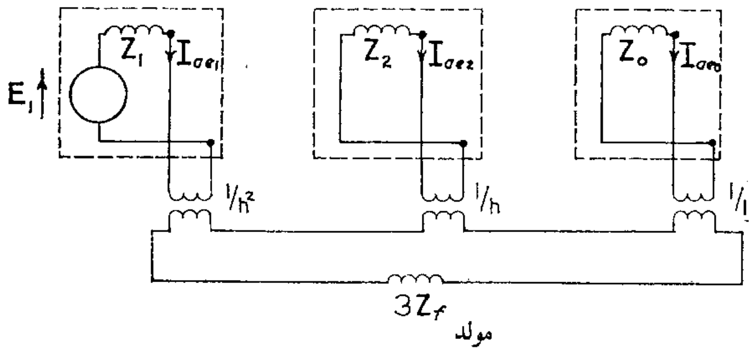
وبتعويض [7.55] في [7.53] ينتج

$$\mathbf{I}_{ae0} = -(1+h)\mathbf{I}_{ae1} = h^2\mathbf{I}_{ae1} \qquad [7.56]$$

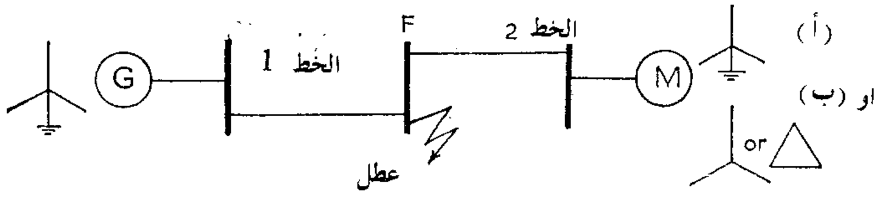
باخذ [7.52], [7.55] وكذلك [7.56] سوية ينتج

$$h^2\mathbf{V}_{ae1} + h\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = 3\mathbf{Z}_f\mathbf{I}_{ae0} \qquad [7.57]$$

تتحقق المعادلات [7.55] , [7.56] و [7.57] بالترابط البيني لشبكات التتابع المبينة في الشكل 7.2. لذا فان شبكات التتابع التي تمر فيها تيارات التتابع لطور معين (الطور المرجع) عندما يكون العطل متماثلاً بالنسبة الى طور آخر مختلف ، تكون مرتبطة بعضها مع بعض بوساطة محولات تيار لهاعدد لفات متساو للابتدائي والثانوي مع ازاحات طورية مقدارها 0°، 120°، و 240° من الواضح في هذه الحالة البسيطة ، انه يمكن ارجاع التماثل في حالة واحدة فقط وهي جعل الطور b طوراً مرجعاً ، لكن الاعطال التي ليس لها تماثل اطلاقا قد تتسبب في حدوث اضطرابات اكبر .



الشكل 7.2. ربط شبكات التتابع بعضها مع بعض لعطل ارض على طور ليس مأخوذاً على أنه طور مرجع .

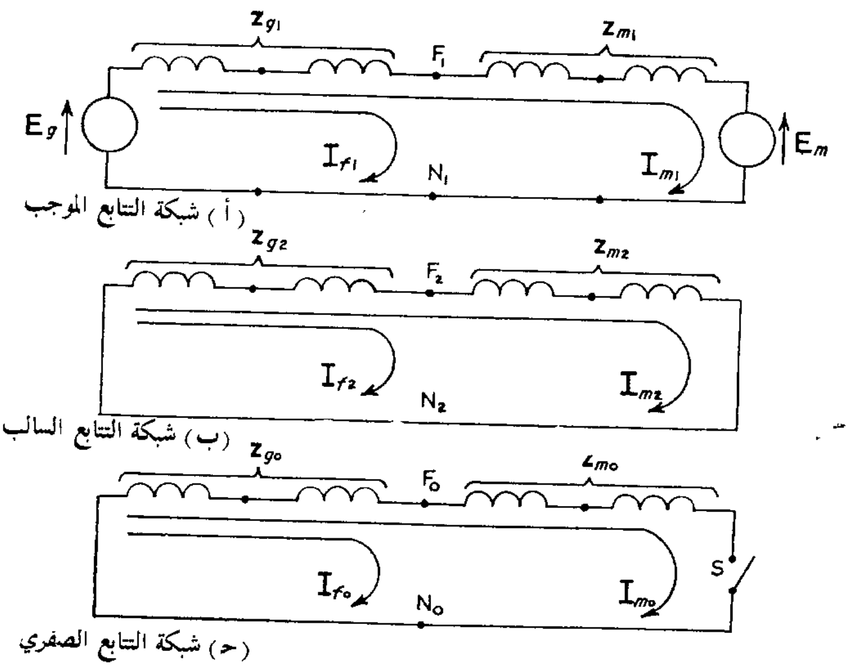


الشكل 7.3. عطل على منظومة توجد على جانبيها مكائن تزامنية .

7.6.4 المنظومة التي لها مكائن تزامنية على كلا جانبي العطل :

SYSTEM WITH SYNCHRONOUS MACHINES ON BOTH SIDES OF THE FAULT

في الامكان اختزال منظومة قدرة حدث فيها عطل تواز الى نوع من انواع الدائرة المبينة في الشكل 7.3 حيث تكون فيها G مكافئة لماكنة تزامنية مفردة تقوم بالتوليد ، و M مكافئة لماكنة تزامنية قد تكون قائمة بالتوليد أو تعمل محركاً . ويبين الشكل 7.4 شبكات التتابع من غيران تربط بعضها مع بعض ولطورمرجع وهو a ، حيث تمثل z_{g1} مجموع ممانعات التتابع الموجب للماكنة G والخط رقم 1 وتمثل z_{m1} مجموع ممانعات التتابع الموجب للماكنة G والخط رقم 2 والشيء نفسه يكون لشبكات التتابعين الاخرين . وفي شبكة التتابع الصفري ، يغلق الاقليد S للحالة (أ) في الشكل 7.3 أويفتح للحالة (ب) في الشكل 7.3 حيث تم فرض الحالة (ب) هنا . لكن اذا طبقت الحالة (ب) فعندئذ قد تؤخذ قيمة z_{m0} بوصفها لانهاية .



الشكل 7.4. شبكات التتابع غير المربوطة للمنظومة المبينة في الشكل 7.3.

لقد وضحت الطريقة بتأمل ابسط حالة لعطل ارض له ممانعة مقدارها صفر على الطور a عند النقطة F من المنظومة المبينة في الشكل 7.3 وكما تم بيانه في الفصل 8 من الجزء الاول ، تكون شبكات التتابع الثلاث للطور a مربوطة على التوالي بعضها مع بعض

هذا النوع من العطل بحيث تكون F_1 مربوطة الى N_2 , F_2 الى N_0 و F_0 الى N_1 .
واذا عرفت تيارات الشبيكة بحيث ان احدهما وليكن I_{f1} هوتيارالعطل لذلك التابع ،
بينما يكون الاخر ، I_{m1} ، هو التيار لذلك التابع في شبيكة واحدة من الدائرة قبل
حدوث العطل ، يمر تيار $I_{f1} = I_{f2} = I_{f0}$ خلال هذه التوصيلات وفي الممانعات
z_{g1} , z_{g2} وكذلك z_{g0} .
وتكون معادلات الشبيكات كالاتي

$$\begin{bmatrix} (E_g - E_m) \\ E_g \\ \hline \\ \\ \hline \\ \\ \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \\ 2 \\ \\ 0 \\ \\ \end{matrix} =$$

$$= \begin{array}{c} \\ m \\ f \\ m \\ f \\ m \\ f \end{array} \overset{\begin{array}{cc|cc|cc} \multicolumn{2}{c}{1} & \multicolumn{2}{c}{2} & \multicolumn{2}{c}{0} \\ m & f & m & f & m & f \end{array}}{\left[\begin{array}{cc|cc|cc} (z_{g1}+z_{m1}) & z_{g1} & & & & \\ z_{g1} & (z_{g1}+z_{g2}+z_{g0}) & z_{g2} & & z_{g0} & \\ \hline & z_{g2} & (z_{g2}+z_{m2}) & & & \\ & & & & & \\ \hline & z_{g0} & & & (z_{g0}+z_{m0}) & \\ & & & & & \end{array}\right]} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{f1} \\ \hline I_{m2} \\ I_{f2} \\ \hline I_{m0} \\ I_{f0} \end{bmatrix} \qquad [7.58]$$

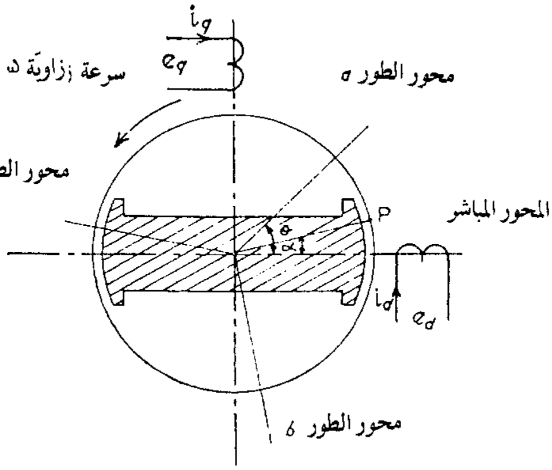
واما الاسطر في مصفوفة الممانعة لـ [7.58] المناظرة لـ I_{f2} و I_{f0} فتترك غير مملوءة ذلك لان هذين التيارين يكون كل منهما مساوياً لـ I_{f1} .
ويمكن الحصول على حل لتيار العطل الحقيقي كالاتي
(أ) بعكس مصفوفة الممانعة في [7.58] ليعطي $[Z_s]^{-1}$.

(ب) احتساب المركبات المتماثلة لتيارات الشبيكة من $[I_s] = [Z_s]^{-1}[E_s]$
(جـ) تحويل هذه التيارات الى تيارات الشبيكة الحقيقية بوساطة [7.33] .
(د) الحصول على تيارات الفروع الحقيقية بمعاينة الشكل 7.4 او بوساطة مصفوفة ربط (انظر المعادلة 8.3 للفصل القادم) .

7.7 التحويل الى محوري الدوار الثابتين (المباشر والتعامدي)

7.7 Transformation to rotor fixed axes (direct and quadrature axes)

من المعتاد ان الدوار في ماكنة تزامنية يدور ضمن ملف ثابت هو ملف الساكن . ولكن من باب الأستفادة قد يتم عد الدوار نفسه ساكناً . بينما يدور ملف الساكن الثلاثي الطور بسرعة زاوية $\omega = d\theta/dt$. على هذا الأساس يتم التحويل بين محاور دوارة ومحاور ثابتة بحيث ان ملف الساكن ذا الأطوار الثلاثة يمكن ان يستعاض عنه بملفين ساكنين كاذبين . احدهما على المحور المباشر والثاني على المحور التعامدي . وكما موضح في الشكل 7.5 (راجع الفقرة 7.4 من الجزء الأول) . مع أنه من الناحية الفيزياوية يكون الفيض في الماكنة اكثر اهمية من القوة الدافعة المغناطيسية (راجع Harris و Stephen-son, Law.enson . 1970) . وهذان يكونان متناسبين بعضهما مع بعض في ماكنة غير مشبعة ذات دوار اسطواني فقط . يكون من الأسهل في المبحث الحاضر استعمال وحدة ق . د . مغ بدل وحدة فيض . وقد تؤخذ وحدة ق . د . مغ لتكون القيمة القصوى لموجة جيبية فراغية للـ ق . د . مغ التي تنشئها وحدة



الشكل 7.5. ماكنة تزامنية مثالية ذات قطبين .

تيارات ثلاثية الطور متوازنة في أطوار الساكن الثلاثة (أي 1·5 مرة بقدر ذروة الـ ق . د . مغ الجيبية الناتجة عن ج . م . ت تيار الحمل الكلي في طور واحد) . على هذا الأساس فان الملفين الكاذبين للمحورين المباشر والتعامدي يفترض ان يكون لكل منهما عدد لفات تعادل 1·5 مرة بقدر ملفات الطور لكل واحد منهما . ولأجل ان تكون التيارات اللحظية في الملفين وهي i_d و i_q مكافئة للتيارات اللحظية في أطوار الساكن i_a و i_b و i_c فان مجموعتي التيارات هذه يجب ان تنتج الـ ق . د . مغ نفسها عندأيةنقطة وفي كل اللحظات الزمنية . وبمساواة القوتين الدافعتين المغناطيسيتين عند أية نقطة ولتكن P (الشكل 7.5) ينتج

$$i_d \cos\alpha + i_q \sin\alpha = \tfrac{2}{3}(i_a \cos(\theta-\alpha) + i_b \cos(\theta - 2\pi/3 - \alpha) + i_c \cos(\theta - 4\pi/3 - \alpha))$$

وبمساواة عوامل $\cos\alpha$ وكذلك عوامل $\sin\alpha$ ينتج

$$i_d = \tfrac{2}{3}(i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 2\pi/3) + i_c \cos(\theta - 4\pi/3)) \qquad [7.59]$$

$$i_q = \tfrac{2}{3}(i_a \sin\theta + i_b \sin(\theta - 2\pi/3) + i_c \sin(\theta - 4\pi/3)) \qquad [7.60]$$

ولايمكن انتعكس كل من [7.59] و [7.60] ذلك لأن بالأمكان عكس المصفوفة المربعة فقط (الملحق م . 1.8) ، مع ذلك فان تيارات الأطوار يجب ان يعبر عنها بدلالة تيارات المنظومة البدائية الكاذبة . لذا نحتاج الى معادلة اضافية اخرى لجعل عكس هذه المعادلات ممكناً ، وهذه المعادلة يمكن ان نحصل عليها من التيار $i_0 = \frac{1}{3}(i_a+i_b+i_c)$ الذي هو تيار لحظي مشابه لـ ج . م . ت مركبة التتابع الصفري للتيار (راجع الفصل 8 ، الجزء الأول) . ان هذه التيارات الثلاثة الكاذبة التي يتضمنها i_0 والمارة في ملفات الأطوار الثلاثة a , b ، c لاتنتج أي فيض في الفجوة الهوائية ولكنها تنتج فيضاً متسرباً فقط . لذلك فانها لاتظهر في العلاقات بين تياري المحورين المباشر والتعامدي وبين تيارات الأطوار الثلاثة الحقيقية . وبجمع هذه المعادلة للتيار i_0 مع المعادلتين [7.59] و [7.60] ينتج

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta-4\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [7.61]$$

وبعكس [7.61] (وهذه قد يتم اجراؤها من قبل الطلبة تمريناً) ينتج

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta-4\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad [7.62]$$

ان [7.61] تناظر المعادلة العامه [7.1] التي تعطي تيارات المنظومة البدائية بدلالة التيارات الحقيقية . لذلك فان [7.5] تعطي علاقة الفولتية لثبوت القدرة (القدرة اللامتغيرة) بين المنظومتين كالآتي

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-2\pi/3) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta-4\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e'_0 \end{bmatrix} \quad [7.63]$$

وبمقارنة [7.62] و [7.63] يتبين ان مصفوفات التحويل التامة للتيارات ليست مصفوفات التحويل نفسها للفولتيات ، على أية حال تكون العلاقات بين تيارات وفولتيات المحورين وتيارات وفولتيات الأطوار الثلاثة الحقيقية هي نفسها بالضبط وذلك لعدم ظهور i_o و e'_o فيها . ويعطي معكوس [7.63] القيمة $e'_o = e_a + e_b + e_c$ بدلاً من القيمة $e_o = \frac{1}{3}(e_a + e_b + e_c)$ التي تتناظر مع مركبة التتابع الصفري للفولتية . والسبب في هذا الأختلاف يعود الى ان شرط القدرة اللامتغيرة

$$e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = e_d i_d + e_q i_q + e'_o i_o \qquad [7.64]$$

يكون مطبقاً في هذه الحالة في حين لايكون مطبقاً في التحويلات الأعتيادية للمركبات المتماثلة (الفقرة 7.6) .

7.8 مركبات α و β والصفر (مركبات كلارك) :

α ، β and zero components (Clarke's components)

من الممكن تحليل الحالات غير المتوازنة في المنظومات الثلاثية الطور باستخدام مركبات كلارك α و β والصفر بدلاً من المركبات المتماثلة . وربما تظهر هذه الطريقة في الكتب المنهجية بصورة نسبية أكثر مما تظهر في التطبيقات العملية . مع انها قد تستخدم بين الفينة والفينة (Adkins, Ching 1954 على سبيل المثال) . أما التطرق اليها هنا فهو لاتمام وبيان علاقتها مع التحويل المذكور في الفقرة السالفة . فعوضاً عن الملفين d و q المبينين في الشكل 7.5 اللذين يحملان تيارات ثابتة ناتجة عن تيارات معينة في الساكن . قد نقوم بتعريف ملفين كاذبين جديدين يكونان ثابتين بالنسبة الى ملفات الساكن b و a و c ويحملان تيارين لحظيين لمنظومة ثنائية الطورهما i_α, i_β . ان هذا يتم بوضع $\theta = 0$. بحيث ان الملف الأول لهذه الملفات يقع على محور الطور المرجع a ولما كان دوران الطور هو α , β . فان محور الطور المرجع يجب ان يتأخر بزاوية مقدارها 90° خلف الملف الأول من هذه المنظومة . وبذلك يكون متقدماً بزاوية 30° على محور الطور b وبمساواة القوى الدافعة المغناطيسية ينتج

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad [7.65]$$

لذلك تكون مركبات α في الطورين b و c متساوية ولكنها مختلفة في الأشارة ويكون مقدارها نصف مقدار مركبة α في الطور a أما مركبات β في الطورين b و c فتكون متساوية في المقدار ولكنها مختلفة في الأشارة. بينما تكون مركبة β في الطور a صفراً.

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفصل الثامن

تحليلات منظومة القدرة
POWER SYSTEM ANALYSIS

8.1 مقدمــــة

بدأ تطوير النماذج التشابهية لمنظومات القدرة المسماة بمحللات شبكات التيار المتناوب منذ أواخر العشرينات (1920s) ، لدراسة المنظومات المعقدة المتنامية والتي كانت تحتاج الى تحليلات تفصيلية متزايدة . كما وبدأ أستخدام الحاسبات الرقمية في هذا النوع من التطبيق في أواخر الأربعينات 1940s وزاد استعمالها عندما توفرت مكائن أكبر وأسرع في العقد التالي . وتستعمل الحاسبات الرقمية الآن للتحليلات الرئيسية كلها مثل التخطيط لأختيار أي من البدائل العديدة الممكنة وتصميم وتشغيل منظومة جديدة أو التي تحتاج الى توسيع .

ان مشاكل تحليلات القدرة التي تحل بالحاسبات الرقمية تقع تحت ثلاثة عناويـــن رئيسية :

(أ) حسابات العطل أو الدورة القصيرة التي نحتاجها لتصميم منظومات الحمايـــة ولتحديد القدرة المقننة لقواطع الدورة . ان الحسابات التي تجري عادة هي لدورة قصيرة ثلاثية الطور ولعطل أرضي على طور واحد . وقد تم توضيح مباديء هذه الحسابات بالاضافة الى الاعطال غير المتوازنة الاخرى التي تحلل أحياناً في الجزء الأول ، الفصل 8 .

(ب) دراسات استقرارية القدرة التي نحتاجها لضمان استطاعة منظومة القدرة البقاء في حالة تزامن خلال الاضطرابات الرئيسية مثل الأعطال ، ضياع وسائط التوليد أو النقل ، أو التغيرات الكبيرة المفاجئة التوليد أو النقل ، أو التغيرات الكبيرة المفاجئة

والمستديمة في الحمل . وقد تم توضيح المبادىء المتضمنة في هذه الحسابات في الفصل 3 .

(ج) مسائل سريان الحمل التي تحسب فيها فولتيات قضبان التوزيع وسريان القدرة المركبة للحالة المستقرة لمنظومة موجودة لغرض تقويم وتنظيم أدائها ، وتستعمل كذلك لتحليل الخطط البديلة للتوسع المستقبلي للايفاء بطلبات الحمل الجديدة .

في الفصل الحالي سيتم تطوير بعض المبادىء الأساسية لتحليلات منظومات القدرة من الأسس التي وضعت في الفصل 7 ، كما سيتم اجمال تطبيقاتها في ايجاد الحلول الرتيبة المنتظمة لمسائل سريان الحمل

8.2 طريقة التيارات الشبيكية والمصفوفات الرابطة
Mesh current method and connection matrices

8.2.1 المعادلات الاساسية BASIC EQUATIONS

تحليلات التيارات الشبيكية هي احدى طرق حل معادلات الشبكة عن طريق تحويل معادلات حالة الشبكة الى منظومة نظيرة أخرى (انظر الفصل7) . ويمكن

توضيح الطريقة بوساطة منظومة القدرة الثلاثية الطور المتوازنة البسيطة المبينة في شكل 8.1 (أ) ، وأحد أطوارها ممثل بالشكل 8.1 (ب) حيث ان z_{dd} و z_{ee} هما ممانعتا الحملين الساكنين (سويةً مع الممانعات المتوازية لدائرة Π الاسمية التي تمثل خط النقل ما لم تكن هذه الممانعات أكبر بكثير من ممانعات الحمل فعند ذاك يمكن اهمالها) . وكل الممانعات التبادلية بين الفروع مثل z_{ad} و z_{dc} . . . الخ يمكن عدها صفراً . ان التيارات والفولتيات الدافعة (ق . د . ك .) والممانعات للفروع مبينة بالاحرف الصغيرة ، أي i_a, e_a, z_a . . . الخ لكي نميزها عن التيارات الشبيكية I_1 , I_2 , I_3 والفولتيات الدافعة الشبيكية E_1 , E_2 , E_3 والممانعات الذاتية الشبيكية Z_{11} ، Z_{22} Z_{33} . كل التيارات اوالفولتيات ذات قيم ج . م . ت لكميات متغيرة جيبياً وذات تردد واحد .

بالنظر الى الشبيكيات الثلاث 1 , 2 , 3 في شكل 8.1 (ب) يمكننا كتابة المعادلات الثلاثة التالية

$$
\left.\begin{aligned}
e_a &= (z_{aa}+z_{dd})I_1 - z_{dd}I_2 \\
0 &= -z_{dd}I_1 + (z_{cc}+z_{dd}+z_{ee})I_2 - z_{ee}I_3 \\
-e_b &= -z_{ee}I_2 + (z_{bb}+z_{ee})I_3
\end{aligned}\right\} \qquad [8.1]
$$

هذه المعادلات يمكن اعادة كتابتها كما يلي

$$
\left.\begin{aligned}
E_1 &= Z_{11}I_1 - Z_{12}I_2 - Z_{13}I_3 \\
E_2 &= -Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 - Z_{23}I_3 \\
E_3 &= -Z_{31}I_1 - Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3
\end{aligned}\right\} \qquad [8.2]
$$

وبصورة عامة

$$E_n = -Z_{n1}I_1 - Z_{n2}I_2 \ldots + Z_{nn}I_n - Z_{n(n+1)}I_{(n+1)} \cdots$$

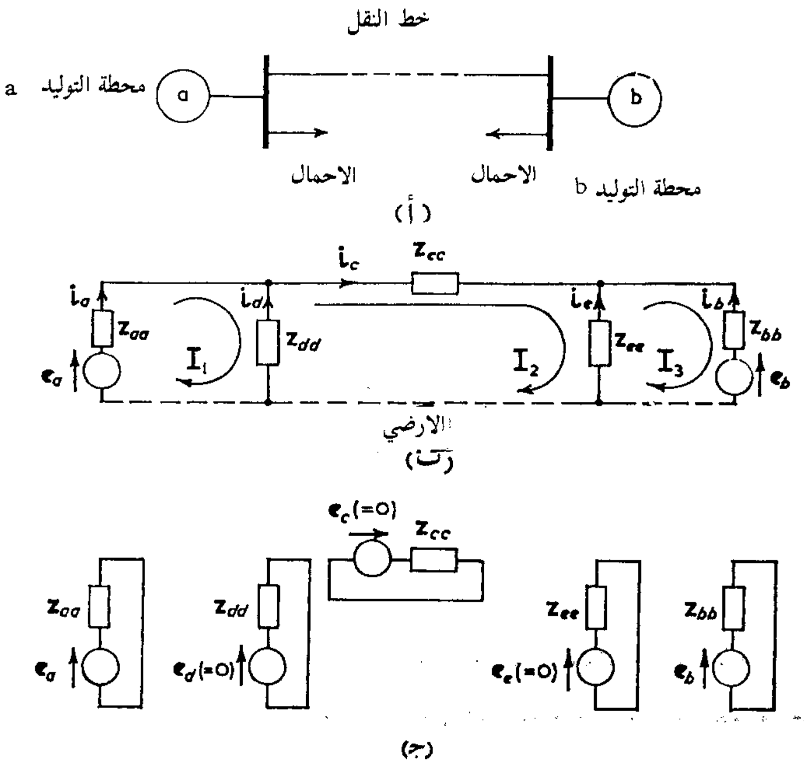
حيث أنه للشبيكة n تكون E_n هي الفولتية الدافعة الكلية باتجاه عقرب الساعة Z_{nn} هي الممانعة الذاتية الشبيكية والتي هي الممانعة الكلية حول الشبيكة Z_{nm} هي الممانعة التبادلية بين الشبيكتين n و m (هي للحالة المتمعن بها ذات التقارن التبادلي الصفري بيـــن الفروع وستقل الى الممانعة المشتركة لكلا الشبيكتين) . ولشبكة ثنائية (وتحليلات منظومات القدرة الحاوية علىعناصر غير ثنائية مثل المقومات والمقومات العكسية ســوف لانتعامل معها في هذا الكتاب رغم ان المغيرات قد تم التمعن بها في الفصل 6) ، $Z_{nm} = Z_{mn}$ ومعاملات الممانعة في مصفوفة ممانعات الشبيكة للمعادلة [8.2] يجب ان تكون متماثلة حول الخط القطري المكون بوساطة حدود الممانعة الذاتية . والحدود غير القطرية (الممانعات التبادلية للشبيكة) تكون كلها سالبة عند استعمال هذا المصطلح للتيار الدوري . بتدقيق الشكل 8.1 يمكن كتابة العلاقات بين تيارات الـــفروع وتيارات الشبيكات كما يلي

$$i_a = I_1;\ i_b = -I_3;\ i_c = I_2;\ i_d = (I_2 - I_1);\ i_e = (I_3 - I_2)$$

هذه المحددات التي يضعها ربط الفروع المبين في شكل 8.1 على تيارات الفروع يمكن أن يعبر عنها بدلالة المصفوفة الرابطة [C] بحيث أن

$$[i] = [C][I] \qquad [8.3]$$

وبما أن



شكل 8.1. التيارات الشبيكية

(أ) منظومة قدرة بسيطة

(ب) الشبيكات

(ج) منظومة بدائية ذات فروع مقصورة الدائرة مفصولة

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \qquad [8.4]$$

لقد بينا في الفصل 7 (أنظر[7.1] و[7.5]) أنه في حالة ثبوت القدرة تكـــون مصفوفة الفولتية الدافعة الشبيكية [E] مرتبطة بمصفوفة الفولتية الدافعة الفرعية [e] بالمعادلة

$$[E] = [C^*]_t[e] \qquad [8.5a]$$

وبما ان [C] تحتوي على حدود حقيقية فقط فان :

$$[E] = [C]_t[e] \qquad [8.5b]$$

العلاقة بين مصفوفة فولتية الدفع للفرع [e] وعصفوفة التيار للفرع [ ] للمنظومـة البدائية المكونة عندما تكون الفروع كل في موضعه الخاص في الفضاء . ولكنها معزولة كهربائيا (رغم أنها ليست معزولة مغناطيسياً) . وعندما تكون الفروع كلها مقصورة الدائرة (أنظر شكل8.1(جـ)) . ستكون كما يلي :

$$[e] = [z][i] \qquad [8.6]$$

حيث أن مصفوفة ممانعة الفرع [z] هي

$$[z] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ad} & z_{ae} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bd} & z_{be} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cd} & z_{ce} \\ z_{da} & z_{db} & z_{dc} & z_{dd} & z_{de} \\ z_{ea} & z_{eb} & z_{ec} & z_{ed} & z_{ee} \end{bmatrix}$$

وبما أنه في الحالة التي تمعنا بها هنا لايوجد تقارن متبادل بين فروع الدائرة المبينة في شكل 8.1 . فان z ستتقلص في هذه الحالة الخاصة الى

$$[z] = \begin{bmatrix} z_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{bb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_{dd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_{ee} \end{bmatrix} \qquad [8.7]$$

التيارات في الفروع المقصورة الدائرة المنفصلة للشبكة البدائية لشكل 8.1 (جـ) موصولة بالتيارات الشبكية في دائرة شكل 8.1 (b) ، حيث تكون الفروع مترابطة بينياً ، بالمعادلة [8.3] باستعمال مصفوفة الربط المعطاة بالمعادلة [8.4] ومن [8.5] و [8.6] نحصل على

$$[\mathbf{E}] = [\mathbf{C}]_t[\mathbf{z}][\mathbf{i}]$$

وباستعمال [8.3] نحصل على

$$[\mathbf{E}] = [\mathbf{C}]_t[\mathbf{z}][\mathbf{C}][\mathbf{I}] \qquad [8.8]$$

بحيث أنه اذا تم وصل مصفوفة فولتية الدفع الشبكية [E] ، ومصفوفة التيـارات الشبكية [I] بمصفوفة ممانعة الشبكة [Z] فعندئذ

$$[\mathbf{E}] = [\mathbf{Z}][\mathbf{I}] \qquad [8.9]$$

هذا هو نمط المصفوفة للمعادلة [8.2] حيث أن

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{C}]_t[\mathbf{z}][\mathbf{C}] \qquad [8.10]$$

ان المعادلـة [8.10] هي مثال لتطبيق المعادلة [7.6] .

لدائرة الشكل 8.1 .

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{z}_{bb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{z}_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{z}_{dd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{z}_{ee} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

وستعطينا المعادلة أعلاه النتيجة التالية (يترك امر تحقيق ذلك الى الطالب القاريء)

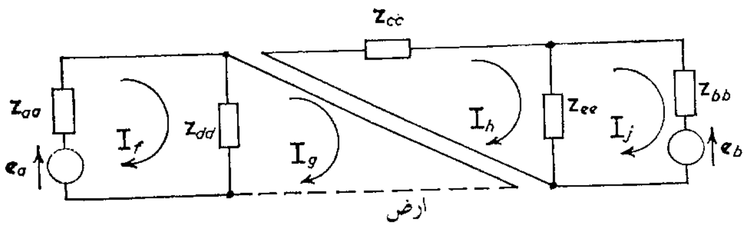
$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} (\mathbf{z}_{aa}+\mathbf{z}_{dd}) & -\mathbf{z}_{dd} & 0 \\ -\mathbf{z}_{dd} & (\mathbf{z}_{cc}+\mathbf{z}_{dd}+\mathbf{z}_{ee}) & -\mathbf{z}_{ee} \\ 0 & -\mathbf{z}_{ee} & (\mathbf{z}_{bb}+\mathbf{z}_{ee}) \end{bmatrix} \qquad [8.11]$$

والتي تؤيدها المعادلتان [8.1] و [8.2]

8.2.2 الترابط البيني للشبكات التي جزئت اليها المنظومة

– INTERCONNECTION OF NETWORKS INTO WHICH A SYSTEM HAS BEEN SUBDIVIDED

في الفقرة السابقة تم توضيح كيفية الحصول على مصفوفة ممانعة الشبكة لكل الشبكة من مصفوفة الممانعة [Z] لشبكة أكثر بساطة (تدعى أحيانا الشبكة البدائية) تتألف من كل فرع مفصول عن كل الفروع الاخرى ومقصور الدائرة كما موضح في شكل 8.1 (جـ) . ليس من الضروري في الحقيقة تقسيم الشبكة الى فروع فردية منفصلة ولكن بدلا من ذلك من الممكن تقسيمها الى عدد من الشبكات المتفاصلة



شكل 8.2 منظومة شكل 8.1 مقسمة الى شبكتين

وبعد تحليل هذه عشبكات من الممكن اعادة ربطها بينياً لتكون شبكة كاملة . ولمثال بسيط على هذه العملية يمكننا تقسيم الدائرة في شكل 8.1 الى شبكتين كما في شكل 8.2 وفيما يخص الشبكة التي على اليسار في شكل 8.2 فان مصفوفة الفولتية الدافعة [E′] ومصفوفة تيارات الشبيكة [I′] ومصفوفة ممانعة الشبيكة [Z′] حيث ان $[\mathbf{E}'] = [\mathbf{Z}'][\mathbf{I}']$ ستكون

$$[\mathbf{E}'] = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_f \\ \mathbf{e}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{I}'] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_f \\ \mathbf{I}_g \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z}'] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{ff} & \mathbf{Z}_{fg} \\ \mathbf{Z}_{gf} & \mathbf{Z}_{gg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{z}_{aa}+\mathbf{z}_{dd}) & -\mathbf{z}_{dd} \\ -\mathbf{z}_{dd} & \mathbf{z}_{dd} \end{bmatrix}$$

بالتشابه بالنسبة للشبكة التي على يمين شكل 8.2

$$[\mathbf{E}''] = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_h \\ \mathbf{e}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{e}_b \end{bmatrix}$$

$$[I''] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_h \\ \mathbf{I}_j \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z}''] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{hh} & \mathbf{Z}_{hj} \\ \mathbf{Z}_{jh} & \mathbf{Z}_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{z}_{cc}+\mathbf{z}_{ee}) & -\mathbf{z}_{ee} \\ -\mathbf{z}_{ee} & (\mathbf{z}_{bb}+\mathbf{z}_{ee}) \end{bmatrix}$$

الشبكتان المنفصلتان لشكل 8.2 تكونان شبكة بدائية لها مصفوفات فولتية دافعة وتيار وممانعة شبيكية كما يلي

$$[\mathbf{E}'''] = \begin{bmatrix} \mathbf{E}' \\ \mathbf{E}'' \end{bmatrix}; \ [\mathbf{I}'''] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}' \\ \mathbf{I}'' \end{bmatrix}; [\mathbf{Z}'''] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}' & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}'' \end{bmatrix}$$

مرة اخرى يمكن استعمال مصفوفة ربط [C] لوصل تيارات الشبكة البدائية الى تلك التي للشبكة الكاملة (على انه يجب ان يلاحظ انها تختلف عن مصفوفة الربط للفقرة السابقة) .

وبما ان $\mathbf{I}_f = \mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_g = \mathbf{I}_2$, $\mathbf{I}_h = \mathbf{I}_2$, $\mathbf{I}_j = \mathbf{I}_3$, $[\mathbf{I}'''] = [\mathbf{C}][\mathbf{I}]$ (انظر[8.3]) اذاً

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}' \\ \mathbf{C}'' \end{bmatrix}$$

ومصفوفة ممانعة الشبكة للدائرة الكاملة لشكل 8.1 يمكن ان تكتب باستعمال [8.10] كما يلي

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{C}]_t[\mathbf{Z}''][\mathbf{C}]$$

وباستعمال نص التبديل للمصفوفة المجزأة المعطى في الملحق م . 1.5 نحصل على

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{C}'_t \quad \mathbf{C}''_t]\begin{bmatrix}\mathbf{Z}' & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}''\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{C}' \\ \mathbf{C}''\end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{C}']_t[\mathbf{Z}'][\mathbf{C}'] + [\mathbf{C}'']_t[\mathbf{Z}''][\mathbf{C}''] \qquad [8.12]$$

وبضرب مركبات الحد الاول من الجانب الايمن من المعادلة [8.12] لدائرة الشكل 8.2 نحصل على

$$[\mathbf{C}']_t[\mathbf{Z}'][\mathbf{C}'] = \begin{matrix} & 1 & 2 \\ 1 & (\mathbf{z}_{aa}+\mathbf{z}_{dd}) & -\mathbf{z}_{dd} \\ 2 & -\mathbf{z}_{dd} & \mathbf{z}_{dd} \end{matrix}$$

الارقام المقابلة للاسطر والاعمدة للمصفوفة الاخيرة تؤشر الشبكات التي تعود لها هذه الحدود . وبالتشابه .

$$[\mathbf{C}'']_t[\mathbf{Z}''][\mathbf{C}''] = \begin{matrix} & 2 & 3 \\ 2 & (\mathbf{z}_{cc}+\mathbf{z}_{cc}) & -\mathbf{z}_{ce} \\ 3 & -\mathbf{z}_{cc} & (\mathbf{z}_{bb}+\mathbf{z}_{cc}) \end{matrix}$$

وجمع عناصر حدي [8.12] يعطي النتيجة [8.11] . ولكن يجب أن يلاحظ أن تطبيق قاعدة جمع المصفوفات (انظر الملحق م . 1.2) يجب أن تطبق بحذر : وهي كأن كلتا المصفوفتين تحتويان على ثلاثة عناصر في ثلاثة عناصر مع أصفار لكل العناصر في المصفوفة الاولى المناظرة الى الشبكة 3 . واصفار في الثانية لكل العناصر المناظرة للشبكة 1 .

8.3 طريقة فولتية العقدة ومصفوفات الربط

Nodal voltage method and connection matrices

8.3.1 المعـادلات الأساسيـة : BASIC EQUATIONS

تحليلات فولتية العقدة هي البديل لتحليلات تيار الشبيكة لحل معادلات الشبكة . دائرة الشكل 8.1 ثم اعادة رسمها في شكل 8.3 (أ) مع ابدال الممانعات بالمسامحات المناظرة ومع ترقيم العقد بدءً بالعقدة المرجع 0 والتي تكون نقطة الارضي عادة فـي المنظومة الثلاثية الطور. التيار الكلي الجاري بعيداً عن العقدة 1 = صفر $= \mathbf{i}_c + \mathbf{i}_d - \mathbf{i}_a -$ وبكتابة ذلك بدلالة المسامحات والفولتيات الدافعة وجهود عقدة واحدة نسبة الى الاخرى، واعادة ذلك للعقدة 2 ستعطينا المعادلة التالية للعقدة 1

$$0 = \mathbf{y}_{aa}(\mathbf{V}_{10} - \mathbf{e}_a) + \mathbf{y}_{dd}\mathbf{V}_{10} + \mathbf{y}_{cc}\mathbf{V}_{12}$$

وللعقدة 2

$$0 = \mathbf{y}_{cc}\mathbf{V}_{21} + \mathbf{y}_{ee}\mathbf{V}_{20} + \mathbf{y}_{bb}(\mathbf{V}_{20} - \mathbf{e}_b)$$

وباعادة ترتيب الحدود وكتابة $\mathbf{V}_{12} = \mathbf{V}_{10} - \mathbf{V}_{20}$ بحيث أنها لاتتضمن سوى الجهود نسبة الى العقدة المرجع 0 سنحصل على :

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{y}_{aa}\mathbf{e}_a &= (\mathbf{y}_{aa} + \mathbf{y}_{cc} + \mathbf{y}_{dd})\mathbf{V}_{10} - \mathbf{y}_{cc}\mathbf{V}_{20} \\ \mathbf{y}_{bb}\mathbf{e}_b &= -\mathbf{y}_{cc}\mathbf{V}_{10} + (\mathbf{y}_{bb} + \mathbf{y}_{cc} + \mathbf{y}_{ee})\mathbf{V}_{20} \end{aligned}\right\} \qquad [8.13]$$

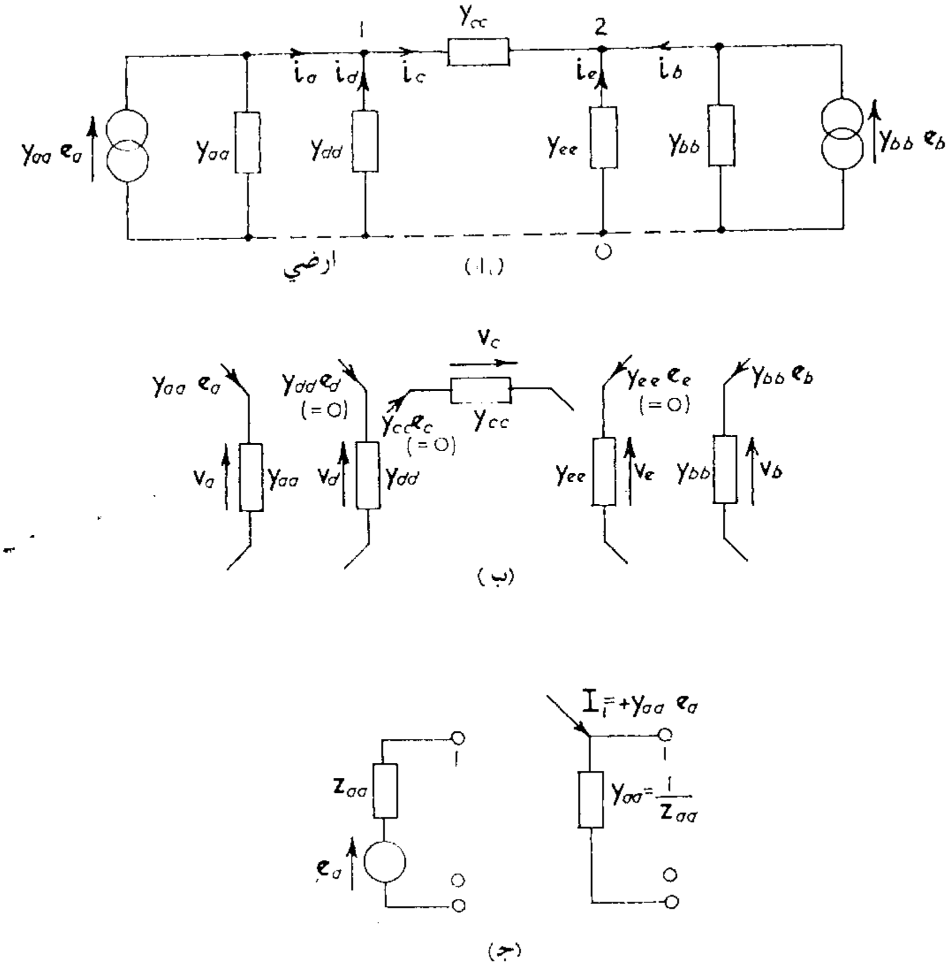
هذه المعادلات يمكن اعادة كتابتها كما يلي

$$\left.\begin{aligned} (\mathbf{ye})_1 &= \mathbf{I}_1 = \mathbf{Y}_{11}\mathbf{V}_1 - \mathbf{Y}_{12}\mathbf{V}_2 \\ (\mathbf{ye})_2 &= \mathbf{I}_2 = -\mathbf{Y}_{21}\mathbf{V}_1 + \mathbf{Y}_{22}\mathbf{V}_2 \end{aligned}\right\} \qquad [8.14]$$

وبصورة عامة

$$(\mathbf{ye})_n = \mathbf{I}_n = -\mathbf{Y}_{n1}\mathbf{V}_1 - \mathbf{Y}_{n2}\mathbf{V}_2 \ldots + \mathbf{Y}_{nn}\mathbf{V}_n - \mathbf{Y}_{n(n+1)}\mathbf{V}_{(n+1)} \ldots$$

ان $(\mathbf{ye})_n$ بالنسبة للعقدة المرقمة n هي مجموع حاصل ضرب الفولتيات الدافعـة والمسامحات للفروع التي تحويها والتي تكون مربوطة مباشرة الى العقدة n . والتي هي فعلا



شكل 8.3 فولتيات العقد

(أ) منظومة قدرة بسيطة

(ب) دائرة بدائية لفروع دائرة مفتوحة منفصلة .

(جـ) تيار العقدة

تيار محقون الى الدائرة عند تلك العقدة . وهذا التيار العقدي يكون موجبا . أي أنه موجه الى الدائرة عند عقدة تكون عندها الفولتية الدافعة موجهة باتجاه تلك العقدة . كما يحدث في كلتا المعادلتين في [8.13] .وهذا موضح في الشكل 8.3 (جـ) . أما اذا كانت الدائرة حاوية عقدة ثالثة مع مصدر ذي ممانعة z_{nn} لها ق.د.ك. e_n باتجاه يبتعد من العقدة 3 . فان التيار المحقون الى العقدة 3 سيكون $I_3 = -y_{nn}e_n$ والذي يؤشر بأن تيارا مقداره $+y_{nn}e_n$ يترك العقدة 3 ويعود الى الدائرة عند العقدة المرجع . أما

Y_{nn} فهي المسامحة الذاتية للعقدة عند العقدة n وتكون مساوية لمجموع مسامحات كتبها المربوطة مباشرة الى تلك العقدة . و Y_{mn} هي المسامحة التبادلية بين العقدتين m و n وتكون مساوية لمجموع المسامحات المربوطة مباشرة بين هذه العقد . وفي شبكة ثنائية الاتجاه خطية $Y_{mn} = Y_{nm}$. V_n تكتب بدلا عن V_{n0} وهي جهد العقدة n نسبة الى العقدة المرجع o .

العلاقات بين فولتيات الفروع (أي فروق الجهد عبر الفروع) وفولتيات العقد يمكن أن تكتب عن طريق تفحص شكل 8.3 (أ) و(ب) كالاتي : $v_b = V_{20}; v_a = V_{10};$ $v_e = V_{20}; v_d = V_{10};\ v_c = V_{20} - V_{10}$ هذه المقيدات يمكن أن يعبر عنها باستعمال مصفوفة الربط [C] حيث أن

$$[v] = [C][V] \qquad [8.15]$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [8.16]$$

ان شرط ثبوت القدرة (انظر [7.9] و [7.10]) يعطينا العلاقة بين تيارات العقد وتيارات الفروع كما يلي

$$[I] = [C^*]_t[i]$$

وبما أن [C] تحتوي هنا على حدود حقيقية فقط فان

$$[I] = [C]_t[i] \qquad [8.17]$$

العلاقة بين مصفوفة تيار الفرع [i] ومصفوفة فولتية الفرع [v] يجب أن تؤخذ الآن بنظر الاعتبار . وباستعمال نظرية نورتن (Norton's theorem) فان كل الفروع الفعالة (أي تلك التي تحتوي على فولتيات دافعة e) يمكن أن تبدل بمصدر تيار ذي (ye) على التوازي مع مسامحة الفرع y . ومصدر التيار يحقن تيارا الى العقدة التي تم توجيه الفولتية الدافعة باتجاهها (انظر [8.13]) . وبذلك فالفروع كلها في الشبكة يمكن

أن توضح بصورة منفصلة بدلالة مسامحتها . كل مسامحة فعالة يربط معها على التوازي مصدر تيار (ye) . وكل من تيارات الفروع يجب أن يعطى بحاصل ضرب مسامحة الفرع وفولتية الفرع (أي فرق الجهد عبر الفرع) بحيث ان

$$[i] = [y][v] \qquad [8.18]$$

ان مسامحة الفرع [y] تكون مصفوفة قطرية مثل مصفوفة ممانعة الفرع [z] لأنه لايوجد تقارن تبادلي في الشبكة التي تحت الدرس ولكنها بصورة عامة تأخذ نمط المصفوفة السابقة لـ [8.7] . والمعادلة [8.18] هي معادلة شبكة بدائية تتألف من كل فروع الشكل 8.3 منفصلة كهربائياً بعضها عن بعض وفي حالة دائرة مفتوحة كل منها ذات تيار عقدي محقون (ye) وكما مبين في شكل 8.3 (ب) . فولتيات الفروع لهذه الشبكة البدائية متصلة بفولتيات العقد للشبكة الكاملة لشكل 8.3 (أ) بوساطة [8.15] و [8.16] . ومن [8.17] و [8.18] نحصل على

$$[I] = [C]_t[y][v]$$

وباستعمال [8.15]

$$[I] = [C]_t[y][C][V] \qquad [8.19]$$

المعادلة [8.19] تبين أن التيارات الدافعة العقدية (التيارات تحقن الى الشبكة عند العقد التي تم ربط فولتيات دافعة لها) متصلة بفولتيات العقد بمصفوفة مسامحة العقدة [Y] وهذه العلاقة يمكن أن تكتب كما يلي :

$$[I] = [Y][V] \qquad [8.20]$$

والذي هو نمط مصفوفة للمعادلة [8.13] . حيث ان

$$[Y] = [C]_t[y][C] \qquad [8.21]$$

ان المعادلة [8.21] هي مثال على تطبيق المعادلة [7.11] للدائرة المبينة في شكل 8.3 (أ) . تكون المسامحة

$$[\mathbf{Y}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{y}_{bb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{y}_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{y}_{dd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{y}_{ee} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

يترك للطالب امر تدقيق حاصل الضرب أعلاه الذي يعطينا نتيجة المعادلة [8.13]
وهذا معناه ان

$$[\mathbf{Y}] = \begin{bmatrix} (\mathbf{y}_{aa}+\mathbf{y}_{cc}+\mathbf{y}_{dd}) & -\mathbf{y}_{cc} \\ -\mathbf{y}_{cc} & (\mathbf{y}_{bb}+\mathbf{y}_{cc}+\mathbf{y}_{ee}) \end{bmatrix} \qquad [8.22]$$

مثال محلول *8.1*

في دائرة شكلي 8.1 و 8.3 $\mathbf{e}_a = 1.1/0^\circ$ p.u.; $\mathbf{e}_b = 1{\cdot}2/30^\circ$ p.u.; $\mathbf{z}_{aa} = j0{\cdot}11$ p.u., $\mathbf{z}_{bb} = j0{\cdot}08$ p.u.; $\mathbf{z}_{cc} = j0{\cdot}05$ p.u.; $\mathbf{z}_{dd} = j1{\cdot}2$ p.u. $\mathbf{z}_{ee} = j1{\cdot}0$ p.u. اهمل المقاومات كافة . اوجد المعادلات التي تربط تيارات العقد بفولتيات العقد .

الحـــل :

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{y}_{aa}\mathbf{e}_a = \frac{-j1{\cdot}1}{0{\cdot}11}\,\underline{/0} = -j10\underline{/0^\circ} \text{ p.u.} = -j10 \text{ p.u.}$$

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{y}_{bb}\mathbf{e}_b = \frac{-j1{\cdot}2}{0{\cdot}08}\,\underline{/30^\circ} = -j15\underline{/30^\circ} \text{ p.u.} = 7{\cdot}5 - j13 \text{ p.u.}$$

$$\mathbf{Y}_{11} = \frac{1}{j0{\cdot}11} + \frac{1}{j0{\cdot}05} + \frac{1}{j1{\cdot}2} = -j29{\cdot}92 \text{ p.u.}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{j0{\cdot}08} + \frac{1}{j0{\cdot}05} + \frac{1}{j1{\cdot}0} = -j33{\cdot}5 \text{ p.u.}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{1}{j0{\cdot}05} = -j20 \text{ p.u.}$$

$$\begin{bmatrix} (0-j10) \\ (7{\cdot}5-j13) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j29{\cdot}92 & j20 \\ j20 & -j33{\cdot}5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

8.3.2 حذف العقد عن طريق المصفوفات الفرعية

NODE ELIMINATION BY MEANS OF SUB-MATRICES

في [8.20] [I] و [V] مصفوفتان عموديتان و [Y] مصفوفة مربعة متماثلة. والاخيرة لها اسطر (وأعمدة) بعدد عقد الدائرة الاصلية (ماعدا العقدة المرجع). ولغرض تقليل الوقت ولتسهيل التعامل مع مسائل منظومات القدرة الكبيرة على الحاسبة ولتجنب اعطاء البيانات غير الضرورية. من المستحسن حذف عقد معينة. وهذه يمكن ان تكون فقط للعقد التي لايدخل عندها تيار الى المنظومة بحيث أنه يجب ان تبقى العقد ذات التوليد كافة. عملية حذف العقد المشروحة في هذه الفقرة هي من النوع الرتيب المنتظم والتي يمكن ان تجري جزء من برنامج حاسبة. حيث انها ستسهم في تبسيط الدائرة. والتي عند اجراء حساباتها ستشمل تقليص عقدة واحدة كل مرة عن طريق اضافة ممانعات عنصرين على التوالي اوعن طريق تحويله مثلثي نجمي (انظر الجزء 1. فقرة 8.2. والملحق 2).

من [8.14] و [8.20] يمكن كتابة معادلة العقدة لشبكة ذات ثلاث عقد (ماعدا العقده المرجع) كما يلي

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \hline I_3 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ \hline Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{array}\right] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \hline V_3 \end{bmatrix} \qquad [8.23]$$

اذا كانت التيارات تدخل على عقدتين فقط من العقد الثلاث فان العقدة الثالثة يمكن ان تحذف وهذه ستأخذ الرقم 3. بحيث ان العقد سترقم ابتداء مع كل العقد (عددها n)

التي يجب ان تبقى وعندها يكتمل ترقيم هذه المجموعة فستعطى الارقام الاخيرة الى العقد التي ستحذف . ومصفوفة المسامحة العقدية [Y] يمكن ان تجزء بعد ذلك بوساطة الخطوط المنقطة المبينة في [8.23] حيث ان الخط الشاقولي هوبين الأعمدة n و($n+1$) والخط الأفقي هو بين الأسطر n و ($n+1$) . بالطريقة نفسها تقسم مصفوفات التيار العقدي والفولتية العقدية بوساطة خط مقطع بين العناصر n و ($n+1$) . وبما ان كل العقد اسفل الخط المقطع هي عقد يجب ان تحذف ولايمكن ان يدخل عندها اي تيار للشبكة . فان كل التيارات العقدية أسفل الخط المقطع يجب ان تكون صفراً .

وبذلك فان [8.23] مع مصفوفاتها قد تم تجزئتها الى مصفوفات فرعية (والتي تم حذف الاقواس المربعة لها بسهولة) ويمكن كتابتها كما يلي :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_r \\ -- \\ \mathbf{I}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \vdots & \mathbf{B} \\ -- & + & -- \\ \mathbf{C} & \vdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_r \\ -- \\ \mathbf{V}_e \end{bmatrix} \qquad [8.24]$$

حيث ان [$\mathbf{I}_r$] هي مصفوفة عمودية للتيارات عند كل العقد التي ستبقى . وفي الحالة الخاصة للمعادلة [8.23]

$$[\mathbf{I}_r] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ -- \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$$

[$\mathbf{I}_e$] هي المصفوفة العمودية لكل العقد التي يجب ان تحذف وكل عنصر فيها يجب ان يكون صفراً . ولشبكة ثنائية الاتجاه $[\mathbf{C}] = [\mathbf{B}]_t$ [كما يوضح تفحص المعادلة [8.23] للحالة البسيطة الممثلة بها) . المسامحات العقدية الذاتية والتبادلية في المصفوفة الفرعية A (تحذف الان الاقواس المربعة للسهولة في كتابة علاقات المصفوفات كما عملنا في [8.24]) هي مسامحات العقد التي ستبقى . بينما التي في D هي للعقد التي ستحذف . B و $\mathbf{B}_t$ ستحتوي فقط على مسامحات تبادلية بين عقدتين احداهما باقية والأخرى ستحذف .

بفك [8.24] نحصل على

$$\mathbf{I}_r = \mathbf{A}\mathbf{V}_r + \mathbf{B}\mathbf{V}_e \qquad [8.25]$$

$$\mathbf{I}_e = \mathbf{B}_t\mathbf{V}_r + \mathbf{D}\mathbf{V}_e = 0 \qquad [8.26]$$

ومن [8.26]

$$V_e = -D^{-1}B_tV_r$$

وبتعويض هذه القيمة في [8.25] نحصل على

$$I_r = AV_r - BD^{-1}B_tV_r \qquad [8.27]$$

الدائرة مع العدد المقلص لعقدها ستكون لها الان مصفوفة مسامحة عقدية [Y] لـكي تستعمل في [8.20] ، والتي ستكون

$$[Y] = A - BD^{-1}B_t \qquad [8.28]$$

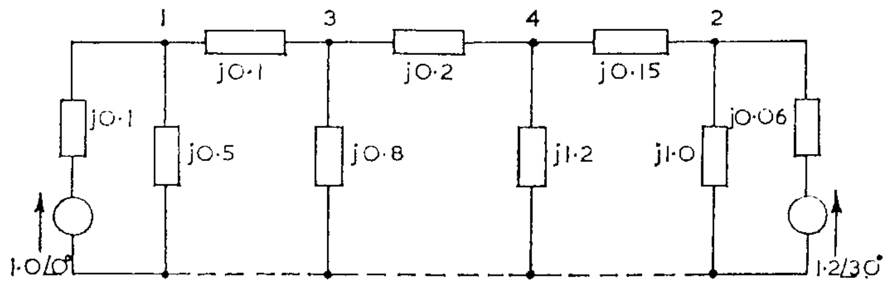
ولـكي نذكر الطالب بأن كل الحدود في [8.28] هي مصفوفات بحد ذاتها ، سنعيد كتابتها مع اعادة الاقواس المربعة

$$[Y] = [A] - [B][D]^{-1}[B]_t \qquad [8.28]$$

في مسامحة العقدة [Y] التي تصل تيارات وفولتيات العقد طبقا لـ[8.20] هناك بعض العناصر التي تمثل فروع التوالي والتي هي مسامحات بين قضيبي توزيع وعناصر اخرى تمثل فروع التوازي والتي هي مسامحات بين قضيب التوزيع والارض الذي هو العقده المرجع . واي حد قطري في [Y] مثل Y_{22} في [8.23] يكون مساوياً لمجموع فروع التوالي والتوازي المربوطة مباشرة الى قضيب التوزيع 2 ولذلك فانها ستتضمن مسامحات التوالي لاي معدات كالمحولات والخطوط ، التأثرية المتوازية للخطوط ، والملفات المفاعلة والمتسعات المتوازية والعناصر المتوازية لاي معدات مثل المحولات (حيث ان مثل هذه قد نحتاج الى تضمينها مثلا للمحولات المتغيرة المأخذ) . وأي عنصر غير قطري مثل Y_{32} في [8.23] يكون سالباً كما تبين [8.14] ويكون مساوياً لمجموع كل مسامحات فروع التوالي المربوطة مباشرة بين قضيبي توزيع (3 و 2 في هذه الحالة) . قد تتضمن ملفات مفاعلة اومتسعات على التوالي اضافة الى عناصر التوالي للدائرة المكافئة للمحول وخط النقل .

مثال محلول 8.2

في دائرة شكل 8.4 قيم القوى الدافعة الكهربائية بنسبة الوحدة والممانعات بنسبة الوحدة (المقاومة مهملة) هي كما مبينة . احذف العقدتين 3 و 4 من الشبكة . ارسم الدائرة المبسطة .



شكل 8.4 منظومة المثال المحلول 8.2 مبينة قيم القوى الدافعة الكهربائية والمفاعلات بنسبة الوحدة

الحـــل

تيارات العقد تكون $\mathbf{I}_1 = -j10$ p.u. و $\mathbf{I}_2 = -j20\underline{/30^\circ} = 10-j17{\cdot}32$ p.u.

ومصفوفة مسامحة العقد لدائرة الشكل 8.4 بعد تفحص الشكل يمكن أن تكتب

$$= -j\left[\begin{array}{cc|cc} 22{\cdot}0 & 0 & -10{\cdot}0 & 0 \\ 0 & 24{\cdot}33 & 0 & -6{\cdot}67 \\ \hline -10{\cdot}0 & 0 & 16{\cdot}25 & -5{\cdot}0 \\ 0 & -6{\cdot}67 & -5{\cdot}0 & 12{\cdot}5 \end{array}\right] \text{p.u.}$$

$$= \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array}\right]$$

$$\mathbf{D}^{-1} = \frac{j}{178}\begin{bmatrix} 12{\cdot}5 & 5{\cdot}0 \\ 5{\cdot}0 & 16{\cdot}25 \end{bmatrix}$$

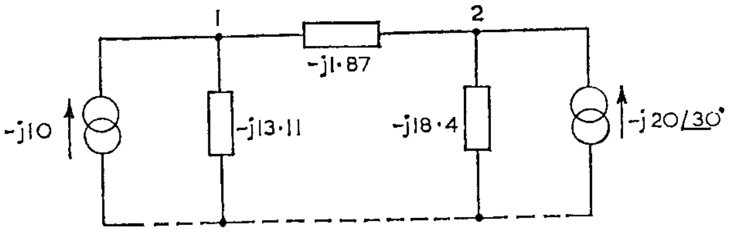
ومصفوفة مسامحة العقد [Y] للدائرة بعد رفع العقدتين 3 و 4 كما معطاة في [8.28] هـي

$$[Y] = -j\begin{bmatrix}22\cdot0 & 0\\ 0 & 24\cdot33\end{bmatrix}+j\begin{bmatrix}-10\cdot0 & 0\\ 0 & -6\cdot67\end{bmatrix}\frac{j}{178}\begin{bmatrix}12\cdot5 & 5\cdot0\\ 5\cdot0 & 16\cdot25\end{bmatrix}\times j\begin{bmatrix}10\cdot0 & 0\\ 0 & 6\cdot67\end{bmatrix}$$

$$= -j\begin{bmatrix}22\cdot0 & 0\\ 0 & 24\cdot33\end{bmatrix}-\frac{j}{178}\begin{bmatrix}-1250 & -333\cdot3\\ -333\cdot3 & -722\end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix}-j14\cdot98 & j1\cdot87\\ j1\cdot87 & -j20\cdot27\end{bmatrix}$$

تفحص [Y] يمكّننا من رسم الدائرة المبينة في شكل 8.5 ، حيث تم كتابة تيارات العقد ومسامحات العقد بنسبة الوحدة عليها هذه الشبكة تم تقليصها الأن الى نمط مثال 8.1 المحلول وفولتيات العقد يمكن حسابها باستعمال معكوس [Y] وكما مبين في مثال 8.3 المحلول . يستطيع الطالب اذا كان راغباً في التدقيق أن يلاحظ أنه باستعمال تحويله نجمي مثلثي مرتين يمكن تبسيط شبكة الشكل 8.4 الى تلك التي لشكل 8.7 . ولكن طريقة التبسيط بتجزئة المصفوفة وباستعمال الحاسبة الرقمية تكون أكثر ملائمة .



شكل 8.5 الدائرة المبسطة لمنظومة الشكل 8.4 مبينا عليها التيارات والمسامحات بنسبة الوحدة .

8.4 تطبيق طريقة فولتية العقدة على حلول مسائل سريان الحمل لمنظومة القدرة

Application of nodal voltage method to the solution of power-system load flow problems

لـكـي يمكننا أكتشاف أحسن الطرق لتشغيل منظومة قدرة موجودة أولتخطيط التوسيعات المستقبلية الممكنة للمنظومة من الضروري تحري حل الحالة المستقرة للشبكة لمختلف متطلبات التوليد والحمل . من الضروري التأكد . مثلاً من أن المنظومة مستقرة وأن خطوط النقل والقابلوات ليست ذات حمل مفرط وان كان بعضها خارج الدائرة وأن كل فولتيات قضبان التوزيع هـي ضمن حدود موصوفة وأن جريان القدرة المتفاعلة في كل المنظومة ذي قيمة مناسبة . ونحتاج دراسات سريان القدرة هذه لأعطاء المقدار وزاوية الطور لـكل فولتية قضيب توزيع . والقدرة الفعالة والمتفاعلة فـي كل خط نقل والقدرة الفعالة والمتفاعلة التـي يجب أن تجهز (فـي الأقل) عند قضيب توزيع توليد واحد والذي يدعـى قضيب التوزيع الطافـي (أو المتأرجح أو 'slack-take-up' في الولايات المتحدة الأمريكية) . رغم أنه من الممكن فـي البداية تعيين الحمل الـكلي والقدرة الداخلة الى الشبكة عند كل قضبان التوزيع تقريباً أوعندها جميعاً الا واحداً . فان الدخل على واحد على الأقل يكون غير معلوم لحين اكمال دراسة سريان الحمـل . لأن فقد القدرة الـكلـي في المنظومة لايمكن تحديده قبل ذلك .

ولذلك . اضافة الى المعلومات عن ممانعات المنظومة وترابطها البينـي والتـي يمكن بسهولة تحويلها الى مصفوفة مسامحة عقدية في حاسبة رقميه . يجب تعيين البيانات التالية فيما يخص العقدة عند البداية . سوية مع الحدود العليا والدنيا لمقادير فولتيات قضبان التوزيع والـقدرة المتفاعـلة . لـكـي نستطيع اجـراء دراسـة حمـل معينة .

(أ) تعيين القدرة المركبة $S = P+jQ$ المأخوذة من الشبكة أو المحقونة اليها عند بعض قضبان التوزيع . هذه غالباً ما تكون العقد التـي يربط اليهـا الحمل .

(ب) تعيين القدرة الفعالة P ومقدار الفولتية عند بعض قضبان التوزيع (يمكن وضع حدود لسريان القدرة المتفاعلة عند قضيب التوزيع) . وهذه عادةً تكون عقـد التوليد . رغم أنه لو حصلنا على الحل بطريقة تقطيع الشبكة الى شبكتين فرعيتين أو أكثر . فان العقدة الرابطة لشبكتين فرعيتين يمكـن كذلك أن تعين بهذه الطريقة .

(جـ) عند قضبان توزيع المولد الذي تم اختياره« على أنه قضيب توزيع طاف »، (ربما لأنه القضيب الأكثر أقتراباً من قضيب التوزيع اللانهائـي لتسهيل الحسّابات) ، يجب تعيين مقدار وطور فولتية قضيب التوزيع . القدرة المركبة S المغذاة الى الشبكة عند قضيب التوزيع هذا تكون غير معلومة الى حين اقرار سريان الحمل ومفاقيد المنظومة ، وهذا تبعاً لذلك يكون جزء من الحـل .

هذه الدراسات تجري دائماً وعلى الأغلب باستعمال الحاسبات الرقمية بدلاً من النماذج الـكهربائية (محللات الشبكة) وسنشير هنا الى الأولـى فقط ان تيـارات وفولتيات الفروع يمكن تحويلها الى النمط الشبكـي (أنظر الفقرة 8.2) أو النمط العقدي (أنظر الفقرة 8.3) (الاحتمال الثالث وهو نمط المجموعة المقطعةلم يناقش هنـا) . ومصفوفات الممانعة الشبيكية يمكن أن تستعمل أحياناً فـي حسابات الدائرة – القصيرة خصوصاً عندما يراد التمعن في التقارن التبادلـي . ولـكنها نادراً ما تستعمل فـي حسابات سريان الحمـل لأن معادلات فولتيـة العقد لها المحاسـن التـــاليـــة :

(أ) عدد المعادلات يكون أقل بصورة عامة .

(ب) لاتـوجـد حاجـة لدمـج الفروع المتوازيـة قبل تكويـن المعادلات، لغرض تقليص عددها .

(جـ) لاتوجد صعوبة في التعامل مع شبكات غير مستوية (non-planar) ، أي عندما يكون في مخطط الشبكة بعض التقاطعات في الفروع .

(د) نسب اللفات البعيدة عن الأسمية للمحولات يمكن تمثيلها بسهولة أكثر (أنظر الفقرة 8.6.3) .

مساويء طريقة العقد التي تنشأ في الحسابات اليدوية ، هي تحويل الممانعات الى مسامحات ، وضرورة حساب فولتيات العقد الى عدد كبير نسبياً من الارقام المهمة لأن تيارات الفروع تعتمد على الفروقات القليلة فيما بينها ، وهي لاتعد مساويء عند استعمال الحاسبـة الرقميـة .

عند أية عقدة r ، اذا كان تيار العقدة المحقون هو I_r وفولتية العقدة هي V_r (فرق الجهد بين تلك العقدة والعقدة المرجع والتي يمكن بصورة عامة تأريضها بما انها تشمل منظومات ثلاثية الطور) والقدرة المركبة / طور المغذاة الى المنظومة عند تلك العقدة هي S_r ، فعندئذٍ (أنظر الجزء 1 ، الملحق 4)

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{V}_r\mathbf{I}_r^* \qquad [8.29]$$

بحيث ان

$$\mathbf{I}_r = \mathbf{S}_r^*/\mathbf{V}_r^* \qquad [8.30]$$

واذا كان هناك n من العقد في الشبكة (ماعدا العقدة المرجع) فعندئذ [8.23] و[8.30] تبين ان دراسة سريان الحمل تشمل حل مجموعة من المعادلات من الدرجة الثانيــة والمعطـــاة بمـــا يـــلي

$$\sum_{k=1}^{n} \mathbf{Y}_{rk}\mathbf{V}_k = \mathbf{S}_r^*/\mathbf{V}_r^* \qquad [8.31]$$

حيث أن $r = 1, 2, 3, \ldots n$ على التتابــع .

الصعوبة في حل مجموعة المعادلات المعطاة في [8.31] هي اللاخطية المتسببة تكون القدرة المركبة والفولتية معتمدة بعضها على بعض . لذلك فان اي طريقة للحل يمكن اعتمادها يجب ان تتضمن استعمال تقريبات متعاقبة .
الطرق المتوفرة للحـل تصنف عادة كما يـــلي :

(أ) مباشـــرة .
(ب) تكـــراريـــة .
(ج) هجينة (خليط من الطرق المباشرة والتكرارية) .

المباديء التي تشتمل عليها الطرق المباشرة حيث يتم عكس مصفوفة مساحمة العقدة ستعطى في الفقرة التالية ، (8.5) ، واثنان من هذه الطرق ستوجزان في الفقرتيـن 8.5.1 و 8.5.2 . ستبين الفقرة 8.6 أنه لمنظومة معطاة نحتاج الى عكس مصفوفة مسامحة العقدة مرة واحدة فقط لأن التحويرات يمكن أن تتم بعد ذلك على المصفوفة المعكوسة لكي تأخذ في الحساب التغيرات المختلفة في المنظومة . مثالان عن الطرق التكرارية تم ايجازهما في الفقرتين 8.7.1 و 8.7.2 وتمت الاشارة بصورة مختصرة الى الطرق الهجينة في الفقرة 8.7.4 . ليس من الممكن هنا مقارنة ميزات أنواع الطرق الثلاثة ، ومناقشة المشاكل النسبية لعكس مصفوفة العقدة بأقل زمن ومجال خزن في الحاسبة في الطرق المباشرة والتي يمكن أن تحسّن بوساطة بعض الطرق كالتجزئة (الفقرة 8.5.2) أو التقطيع (الفقرة 8.8) . والحصول على اسرع التقاء ممكن في

الطرق التكرارية (أنظر الفقرة 8.7.3) . مثل هذه المقارنات وكما تم عمله ، تبين أنه من الصعب التعميم ، ولكن حجم الشبكة وحجم الحاسبة هي من العوامل المهمة (أنظر Laughton and Humphrey Davies سنة 1964 و Stagg and El-Abiad سنة 1968) ، وعلى الاغلب فانه كلما كانت المنظومة أكبر كانت محاسن الطرق التكرارية أعظم مقارنة بالطرق المباشرة او الهجينة .

8.5 الطرق المباشرة المشتملة على معكوس مصفوفة مسامحة العقدة

Direct methods involving inversion of the nodal admittance matrix

الطرق المباشرة تشمل حساب مصفوفة ممانعة العقدة [Z] عن طريق عكس مصفوفة مسامحة العقدة [Y] بحيث أنه بدلاً من [8.20] يمكن كتابة المعادلة التالية (على أساس ان محدد $[Y] = |Y| \neq 0$ اي ان [Y] هي مربعة وغير أنفرادية كما هي الحقيقة في مصفوفة مسامحة العقدة لمنظومة قدرة ، (أنظر الملحق م . 1)

$$[V] = [Y]^{-1}[I] = [Z][I] \qquad [8.32]$$

(مصفوفة ممانعة العقدة في [8.32] يجب ان لاتختلط مع مصفوفة الممانعة الشبكية التي تظهر في [8.9] رغم انه تم استعمال العلامات نفسها لكلتا المصفوفتين ، لأن هذا استعمال شائع) . الملحق م . 1 يبين كيفية الحصول على معكوس المصفوفة من المصفوفة الاصلية بطريقة الحساب اليدوي ، ولكن في تحليلات منظومات القدرة حيث يمكن ان تكون المصفوفات كبيرة جداً . يتم استعمال الحاسبات الرقمية حيث يتناسب الوقت المستغرق مع مكعب عدد المعادلات تقريباً . وبسبب عدد المعادلات الكبير الذي تتضمنها دراسة منظومة قدره ، فقد تم ايجاد طرق متعددة لتقليل وقت وخزن الحاسبة . مناقشة مثل هذه الطرق ، سوية مع مراجع اخرى ، معطاة مثلاً في كتاب Laughton and Humphrey Davies سنة (1964) ، واثنان من هذه الطرق تم ايجازها في البندين 8.5.1 و 8.5.2 . والفقرة التالية (8.6) تبين كيف يمكن تحوير معكوس المصفوفة [Z] لكي يجد تأثير تغيرات معينة في الدائرة على سريان الحمل ، مثل اضافة حمل جديد اوربط مكانين مع بعضهما بخط نقل جديد او اخراج خط نقل من الدائرة .

بعد عكس مصفوفة المساحة لتعطينا المصفوفة [Z] والأخيرة يتم تحويرها اذا كان ضرورياً لتتضمن تغيرات الدائرة ، مايزال من الضروري الوصول الى حل عن طريق نمط معين لعملية تكرارية.وهذه العمليات(أنظر (Laughton and Humphrey Davies, 1964 لن تناقش بالتفصيل هنا ولكن الطريقة الاساسية هي كما يلي . تخمن الفولتية والقدرة المركبة لأي قضيب توزيع (اذا لم تكن معينة بطبيعة السؤال وكما نوقشت في الفقرة 8.4). باستعمال هذه الفولتيات والقدرات المركبة يمكن عمل تخمين أولي للتيار عند كل عقدة باستعمال *[8.30]* . وباستعمال مصفوفة ممانعة العقدة ، التي سنحصل عليها باستعمال طريقة مشابهة لأحدى تلك الطرق الموجزة في الفقرتين 8.5.1 و 8.5.2 ، يمكننا الحصول على مجموعة مصممة من فولتيات العقد من [*8.32*] .

عند استعمال هذه المجموعة الجديدة من الفولتيات مع متطلبـــات القدرة ستعطينا مجموعة ثانية من التيارات من *[8.30]* ، والتي ستقود من *[8.32]* الى مجموعة اخرى من الفولتيات . ان دورة برنامج الحاسبة ستتوقف عندما يكون الفرق بين مجموعتين متتابعتين من الفولتيات ضمن حدود مقررة مسبقا .

مثال محلول *8.3*

اوجد فولتيات العقد للمنظومة المبينة في المثال المحلول 8.1

الحـــــل

نتيجة المثال 8.1 يمكن كتابتها

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j29{\cdot}92 & j20 \\ j20 & -j33{\cdot}5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (0 \quad -j10) \\ (7{\cdot}5-j13) \end{bmatrix}$$

$$= -\frac{1}{600}\begin{bmatrix} -j33{\cdot}5 & -j20 \\ -j20 & -j29{\cdot}92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (0 \quad -j10) \\ (7{\cdot}5-j13) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0{\cdot}992+j0{\cdot}25) \\ (0{\cdot}978+j0{\cdot}373) \end{bmatrix} \text{p.u.}$$

8.5.1 حذف كاوسيان GAUSSIAN ELIMINATION

ان مصفوفة مسامحة العقدة [Y] ومعكوسها مصفوفة ممانعة العقدة $[Z]=[Y]^{-1}$ تكونان مرتبطتين كما يلي

$$[Y][Z] = [U] \qquad [8.33]$$

حيث ان [U] هي مصفوفة احادية (انظر الملحق م. 1.7) . ويمكن كتابة [8.33] لابسط حالة لشبكة ذات عقدتين فقط (ماعدا العقدة المرجع) كما يلي :

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

والتي ستعطي المعادلات التالية

$$Y_{11}Z_{11}+Y_{12}Z_{21} = 1 \qquad [8.34]$$

$$Y_{21}Z_{11}+Y_{22}Z_{21} = 0 \qquad [8.35]$$

$$Y_{11}Z_{12}+Y_{12}Z_{22} = 0 \qquad [8.36]$$

$$Y_{21}Z_{12}+Y_{22}Z_{22} = 1 \qquad [8.37]$$

لذلك فان المسامحات الذاتية والتبادلية لشبكة معينة تكون معاملات معلومة في مجموعة من المعادلات الآنية الخطية التي تكون فيها عناصر مصفوفة [Z] غير معلومة والتي يجب ايجادها . وطريقة حذف كاوسيان لمجموع n من المعادلات ذات المجاهيل $x_1, x_2 \ldots x_n$ (عدد العقد هنا$2 = n$وهناك معادلتان في Z_{11} و Z_{21} ومعادلتان في Z_{12} و Z_{22}) هي باضافة تلك المضاعفات من المعادلة الاولى الى المعادلات الاخرى في المجموعة التي تجعل معامل x_1 يساوي صفرا في المعادلة الجديدة الناتجة من الجمع . اذاً هناك معادلات عددها ($n-1$) تحوي المجاهيل التي عددها $(n-1)$ $x_2, x_3 \ldots x_n$. ويكرر ذلك لكل من المجاهيل على التتابع حتى نصل في النهاية الى $a_{nn}x_n = b_n$ حيث ان a_{nn} و b_n تكون معلومة بحيث نستطيع ايجاد x_n . ان تعويض قيمة x_n هذه في المعادلة $(n-1)$ يعطينا x_{n-1} وهكذا .

تطبيق هذه الطريقة على [8.34] و [8.35] يتضمن جمع السابقة مضروبة بالمعامل ($-Y_{21}/Y_{11}$) الى الأخيرة والتي ستعطينا

$$(Y_{22}-Y_{21}Y_{12}/Y_{11})Z_{21} = -Y_{21}/Y_{11}$$

لذلك

$$Z_{21} = -Y_{21}/(Y_{22}Y_{11}-Y_{21}Y_{12}) \qquad [8.38]$$

ويمكن ايجاد Z_{11} بالتعويض . وبطريقة مشابهة يمكن ايجاد Z_{12} و Z_{22} من [8.36] و [8.37] . وهناك عدد من الترتيبات الخاصة لهذه الطريقة تمكن من تقليل الوقت المستغرق في الحاسبة لاجراء هذه العملية .

8.5.2 تجزئة او تحليل المصفوفة المعكوسة الى العوامل
PARTITIONING OR FACTORISED INVERSE MATRIX

مصفوفة مسامحة العقدة يمكن أن تجزأ الى مصفوفات ثانوية مع حذف الأقواس المربعة هنا للسهولة

$$[Y] = \left[\begin{array}{c|c} Y_1 & Y_2 \\ \hline Y_3 & Y_4 \end{array}\right] \qquad [8.39]$$

مقارنة [8.23] و[8.39] تبين أنه في الحالة الخاصة لشبكة ذات ثلاث عقد .

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, [Y_2] = \begin{bmatrix} Y_{13} \\ Y_{23} \end{bmatrix}$$ الخ

وبصورة عامة فان :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ \hline I_b \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} Y_1 & Y_2 \\ \hline Y_3 & Y_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V_a \\ \hline V_b \end{bmatrix} \qquad [8.40]$$

الترميز I_a و I_b و V_a و V_b تم استعماله هنا بدلاً من I_1 و I_2 ... الخ للمصفوفات الثانوية للتيارات والفولتيات لتجنب الخلط مع تيارات وفولتيات العقدة مثل I_1 و V_1 عند العقدة 1 و I_2 و V_2 عند العقدة 2 . مرة أخرى سنحذف الأقواس المربعة حول I_a و I_b و V_a و V_b وبذلك

$$I_a = Y_1V_a + Y_2V_b \qquad [8.41]$$

$$I_b = Y_3V_a + Y_4V_b \qquad [8.42]$$

ومن [8.41]

$$V_a = Y_1^{-1}(I_a - Y_2V_b)$$

وبتعويض هذا التعبير لـ V_a في [8.42] نحصل على

$$I_b = Y_3Y_1^{-1}(I_a - Y_2V_b) + Y_4V_b$$

$$I_b = Y_3Y_1^{-1}I_a + (Y_4 - Y_3Y_1^{-1}Y_2)V_b$$

$$V_b = (Y_4 - Y_3Y_1^{-1}Y_2)^{-1}(I_b - Y_3Y_1^{-1}I_a) \qquad [8.43]$$

واذا كان معكوس [Y] هو [Z] والأخيرة مجزأة الى أربع مصفوفات ثانوية مناظرة للتي في [8.39] . فاذا

$$[Z] = \left[\begin{array}{c|c} Z_1 & Z_2 \\ \hline Z_3 & Z_4 \end{array}\right] \qquad [8.44]$$

و

$$\left[\begin{array}{c} V_a \\ \hline V_b \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} Z_1 & Z_2 \\ \hline Z_3 & Z_4 \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} I_a \\ \hline I_b \end{array}\right] \qquad [8.45]$$

وبذلك فان [8.43] تبين بأن

$$Z_3 = (Y_3Y_1^{-1}Y_2 - Y_4)^{-1}Y_3Y_1^{-1} \qquad [8.46]$$

$$Z_4 = (Y_4 - Y_3Y_1^{-1}Y_2)^{-1} \qquad [8.47]$$

وبالطريقة نفسها . من [8.42]

$$V_b = Y_4^{-1}(I_b - Y_3V_a)$$

وبتعويض هذه القيمة في [8.41] نحصل على

$$I_a = Y_2Y_4^{-1}I_b + (Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)V_a$$

وبذلك فان

$$V_a = (Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)^{-1}(I_a - Y_2Y_4^{-1}I_b) \qquad [8.48]$$

ومن [8.45] و [8.48]

$$Z_1 = (Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)^{-1} \qquad [8.49]$$

$$Z_2 = -(Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)^{-1}Y_2Y_4^{-1} \qquad [8.50]$$

وهكذا فان

$$[Z] = \left[\begin{array}{c|c} (Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)^{-1} & -(Y_1 - Y_2Y_4^{-1}Y_3)^{-1}Y_2Y_4^{-1} \\ \hline (Y_3Y_1^{-1}Y_2 - Y_4)^{-1}Y_3Y_1^{-1} & (Y_4 - Y_3Y_1^{-1}Y_2)^{-1} \end{array}\right] \qquad [8.51]$$

وبما أن المصفوفات التي يجب أن تعكس في [8.51] هي ذات رتبة أقل من [Y] . والزمن اللازم لعملية العكس في الحاسبة يتناسب تقريباً مع مكعب عدد المعادلات (أي الى مكعب رتبة المصفوفة) . فان التجزئة يمكن أن تكون ذات فائدة . وهذا بالتخصيص كذلك عندما تحل معادلات منظومة قدرة كبيرة بحاسبة صغيرة نسبياً . والمصفوفات الثانوية يمكن أن تحتوى ضمن المخزن السريع بحيث يمكننا أن نتجنب التحويلات البطيئة نسبياً من المخزن الساند واليه . يجب أن يلاحظ الطالب (ويدقق لنفسه) أن المصفوفات الثانوية للممانعة يمكن أن تأخذ أنماطاً متعددة . بعضها سيستغرق وقتاً أقل من الأخريات في الحاسبة . مثلاً Z_2 يمكن أن تكتب $-Z_1Y_2Y_4^{-1}$ واذا كنا قد وجدنا V_a من [8.42] وهذه النتيجة عوضناها في [8.41] فعندئذ ستأخذ Z_3 النمط $(Y_2 - Y_1Y_3^{-1}Y_4)^{-1}$

8.6 تحوير معكوس مصفوفة مسامحة العقدة

Modification of the inverse of the nodal admittance matrix

عند خزن معلومات عن منظومة قدرة معينة في الحاسبة على نمط مصفوفة مسامحة عقدة وهذه تم عكسها لكي تعطينا معكوسها الذي هو مصفوفة ممانعة العقدة فيمكننا ايجاد الحل لمجموعة معينة من ظروف الحمل والتوليد . من ناحية ثانية سنحتاج كذلك الى حلول أخرى لعدد من ظروف الشبكة الأخرى فمثلاً اذا تم رفع خط نقل من الدائرة

-أو أن خط نقل جديداً سيربط بين عقدتين أو أنه تم اضافة مسامحة حمل جديدة عند عقدة معينة . لكل من هذه الحالات والتغيرات الأخرى في الدائرة ستكون هناك مصفوفة مسامحة عقدة جديدة ومعكوس مصفوفة جديد . ولكي نحصل على الأخيرة بدون الطريقة الطويلة نسبيا لتكوين مصفوفة مسامحة جديدة واجراء عملية عكس جديدة لهذه المصفوفة الكبيرة ، من الممكن تحوير معكوس مصفوفة مسامحة العقدة .

في مناقشة هذا التحوير سيرمز الى مصفوفة المسامحة ذات الرتبة $n \times n$ الاصلية لشبكة ذات عدد عقد n بالرمز [Y] . وسترفع هنا الاقواس المربعة للسهولة بحيث تظهر المسامحة على انها Y ومعكوسها الاصلي (اومصفوفة ممانعة العقدة) سيكون Y^{-1} وسيتم هذا كذلك بالنسبة لبقية المصفوفات في هذه الفقرة . ان مصفوفة المسامحة الجديدة Y_m للشبكة المحورة ستكون كذلك مصفوفة $n \times n$ مربعة ، اذا لم يتم انشاء عقدة جديدة ، وهذه المصفوفة ستكون حاصل جمع المصفوفة Y الاصلية ومصفوفة تحوير جديدة . ومصفوفة التحوير ، التي يجب ان تكون $n \times n$ ايضا ، يمكن الحصول عليها بسهولة من تغيرات الدائرة الاعتيادية التي نحتاجها لها ، فمثلا اذا تم اضافة مسامحة حمل مكافيء y الى الشبكة بين العقدة r والارضي (العقدة المرجع 0) فان هذا سيؤلف زيادة في المسامحة الذاتية عند العقدة r مقدارها y فقط ، بحيث ان مصفوفة التحوير ستتكون من اصفار كليا عدا العنصر rr الذي سيكون y ومصفوفة التحوير هذه يمكن كتابتها على انها كمية لامتجهة α مضروبة بحاصل ضرب متجه عمودي ذي رتبة n (مصفوفة ذات عمود واحد فقط وعدد اسطر n) ومتجه سطري ذي رتبة n (مصفوفة ذات سطر واحد وعدد اعمدة n) . بحيث ان مصفوفة التحوير ستكون $n \times n$ مثل المصفوفة الاصلية Y (انظر الملحق م . 1) . واذا رمزنا للمتجه العمودي بالرمز G والمتجه السطري هو المنقولة لمتجه عمودي اخر H . فعندئذ ستعطى مصفوفة مسامحة العقدة المحورة الجديدة Y_m على انها مجموع للمصفوفة الأصلية ومصفوفة التحوير .

$$Y_m = Y + \alpha G H_t \qquad [8.52]$$

ومعكوس مصفوفة المسامحة المحورة والتي نحتاج الى الحصول عليها من Y^{-1} بدون عكس Y_m مباشرة سيعطي بالمعادلة

$$\mathbf{Y}_m^{-1} = (\mathbf{Y}+\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t)^{-1} \qquad [8.53]$$

ومعكوس المصفوفة المحورة يمكن ان نحصل عليه باستعمال صيغة المعادلة المعطاة من قبل Woodbury ولـكن للظروف المحددة التي تطبق هنا وهي ان α كمية لامتجهةو G و H هي متجهات عمودية ، يمكن استعمال صيغة المعادلة المعطاة من قبل Kron والتي هي

$$\mathbf{Y}_m^{-1} = (\mathbf{Y}+\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t)^{-1} = \mathbf{Y}^{-1} - \frac{(\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G})(\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1})}{1/\alpha+\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}} \qquad [8.54]$$

يمكننا التحقق من أن [8.54] هي فعلاً متطابقة كما يلي ، رغم ان طريقة التعامل هذه هي ليست دقيقة رياضيا (مثلا هناك ظروف فيما يخص المحددات التي يجب ان توفى ، ولـكن بالنسبة لمسائل منظومة القدرة فان هذه ستوفى في الحقيقة وسوف لاتناقش هنا) . وبالضرب المسبق لـكلا طرفي المعادلة [8.54] بالمقدار $(\mathbf{Y}+\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t)$ ، واعادة كتابة الطرف الأيمن على مقام لامتجه مشترك وضرب الطرفين به نحصل على

$$(\mathbf{Y}+\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t)(\mathbf{Y}^{-1}/\alpha+\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}-\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1})=(1/\alpha+\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G})\mathbf{U}$$

حيث ان U هي مصفوفة احادية ذات رتبة n (الملحق م. 1.7)
ان حاصل الضرب $\mathbf{H}_t\mathbf{G}$ هولامتجه (انظر الملحق م . 1) وبما ان $\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}$ هو متجه سطري ذو رتبة n فان $\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}$ هوكذلك لامتجه β (كما يتبين من تدقيق الابعاد للمعادلة [8.54] الحدود على الطرف الأيسر يمكن الان ان تؤخذ بنظر الاعتبار :
$\mathbf{Y}\mathbf{Y}^{-1}/\alpha = (1/\alpha)\mathbf{U}$ وستلغي الحد الاول على الطرف الأيمن $\mathbf{Y}\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G} = \beta\mathbf{U}$ وستلغي الحد الثاني على الطرف الأيمن . والحدود المتبقية على الطرف الأيسر هي

$$-\mathbf{Y}\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}+\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}+\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\beta-\alpha\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}$$

الحدان الاوليان سيتلاغيان وكتابة β محل المركبات الثلاثة الوسطى للحد الاخير تبين انها ستلغى مع الحد السابق . والتي تحقق المتطابقة في [8.54]

الفقرتان 8.6.1 و 8.6.2 تبينان على التوالي النمط الذي ستتقلص اليه [8.54] بالنسبة للتغيرات في المسامحة المتوازية (اي المسامحة بين اية عقدة والعقدة المرجع) والتغيرات في ممانعة الفرع بين عقدتين . والتحوير الاسبق يمكن ان نحتاجه مثلا (1) للتحقق من

سريان الحمل اذا اجريت تغيرات في مسامحة الحمل (هذا يحتاج كذلك الى تغير في بيانات القدرة المعطاة وكما تمت مناقشته في الفقرة 8.4)او (2) لتمثيل تغير المسامحة المتوازية عندما يتسبب تغير الحمل او خطأ ما في تأرجح العضو الدوار للماكنة المتزامنة . في الحالة الاخيرة حيث يتقرر المنحني المتأرجح بطريقة تكرارية من الضروري كذلك تحوير المصفوفة المعكوسة لتغيير مفاعلات الماكنة المتزامنة من القيم المتزامنة الى المفاعلات العابرة وكذلك لتغيير القوى الدافعة الكهربائية للمكائن من فولتية خلف مفاعلة متزامنة ، الى فولتية خلف مفاعلة عابرة ، (انظر الفصل 3 من هذا الجزء والفصل 7 من الجزء الاول) التحوير الثاني ، هو اننا قد نحتاج الممانعة بين عقدتين مثلا ، لايجاد تاثير خط النقل الجديد الرابط بين نقطتين ، او للتدقيق في انه تحت ظروف سريان الحالة المستقرة لاتكون اجزاء اخرى من منظومة النقل ذات حمل مفرط اذا فصلنا على التتابع عددا من خطوط النقل من الدائرة بسبب الصيانة او بسبب عطل . وفي الحالة الاخيرة اذا كان للخط الذي يربط العقدة f والعقدة k ممانعة توالٍ Z_{fk} فان التحوير الذي نحتاجه في حالة رفع هذا الخط هو ان نربط ممانعة ثانية مقدارها $-Z_{fk}$ بين العقدتين f و k .

أما مأخذ التغيير في المحول فيمكن ان نعامله بتحوير المصفوفة المعكوسة كما مبين في الفقرة 8.6.3 . في هذه الحالة وكذلك حيث لايمكننا اهمال سعة خط النقل سيشمل التحوير التغيرات في دائرة π . من الممكن عمل تحويرات متعاقبة لمعالم التوالي والتوازي ولكن غالبا مايكون عمل هذه التغيرات بصورة منفصلة اكثر ملائمة وكما مبين بالنتائج المعطاة في الفقرات 8.6.1 و 8.6.2

8.6.1 تطبيق على اضافة مسامحة حمل جديدة على عقدة واحدة

APPLICATION TO THE ADDITION OF A NEW LOAD ADMITTANCE AT ONE NODE

اذا اردنا اضافة مسامحة حمل جديدة y الى الشبكة بين العقدة k والعقدة المرجع فان مصفوفة التحوير التي يجب ان تضاف الى Y لكي تعطينا المصفوفة المحورة الجديدة Y_m هي

$$
{}_{\alpha}GH_{t} = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \\ \vdots \\ n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & k & n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0\ldots\ldots & 0\ldots\ldots & 0 \\ 0 & 0\ldots\ldots & 0\ldots\ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & y & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0\ldots\ldots & 0\ldots\ldots & 0 \end{bmatrix} \end{array} \qquad [8.55]
$$

في هذه الحالة من المناسب اختيار $\alpha = 1$ و $\mathbf{H} = \mathbf{G}$ بحيث ان

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \\ \\ k \\ \\ \\ n \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \sqrt{\mathbf{y}} \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \qquad [8.56]$$

الحدود على الطرف الأيمن من [*8.54*] يمكن ان نفحصها الآن. ان معكوس مصفوفة المسامحة الأصلية $\mathbf{Y}^{-1}$ تم الحصول عليه سابقاً (ربما بالطرق المباشرة مثل تلك التي تم اجمالها في الفقرة 8.5). أما بالنسبة للبقية فان

$\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}$ تعطي العمود k من المصفوفة $\mathbf{Y}^{-1}$ مضروباً بـ $\sqrt{\mathbf{y}}$

$\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}$ تعطي السطر k من المصفوفة $\mathbf{Y}^{-1}$ مضروباً بـ $\sqrt{\mathbf{y}}$

$\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\,\mathbf{G}$ تعطي العنصر kk من المصفوفة $\mathbf{Y}^{-1}$ مضروباً بـ $\mathbf{y}$

وبذلـك

$$\mathbf{Y}_m^{-1} = \mathbf{Y}^{-1} - \frac{(\text{column } k \text{ of } \mathbf{Y}^{-1})(\text{row } k \text{ of } \mathbf{Y}^{-1})}{1/\mathbf{y} + \text{element } kk \text{ of } \mathbf{Y}^{-1}} \qquad [8.57]$$

من الواضح ان هناك البديل لاختيار $\mathbf{y} = \alpha$ مع العنصر غير – الصفري الوحيد في $\mathbf{G}$ و $\mathbf{H}$ على أنه 1 . وقد يكون محيراً كتابة $\mathbf{y} = \alpha$ ولكن α تم الأصطلاح عليها على أنّها لا اتجاهية في مواجهة مصفوفة. رغم انها في هذه الحالة تمثل مسامحة مركبة $\mathbf{y} = 1/\mathbf{z} = 1/(R+\mathrm{j}X)$

8.6.2 تطبيق على اضافة ممانعة جديدة بين عقدتين

APPLICATION TO THE ADDITION OF A NEW IMPEDANCE BETWEEN TWO NODES

اذا أضفنا ممانعة جديدة $\mathbf{z}$ الى الشبكة لتربط بين العقدتين f و k فذلك يعني ان الممانعات الذاتية العقدية للعقدتين f و k قد تمت زيادتها بـ $1/\mathbf{z}$ والمسامحات التبادلية العقدية بين العقدتين f و k تم تقليلها بـ $1/\mathbf{z}$ بحيث ان مصفوفة التحوير ستكون

$$\alpha \mathbf{GH}_t = \begin{array}{c} \\ f \\ \\ k \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \quad f \qquad\qquad k \\ \left[\begin{array}{ccccc} & \vdots & & \vdots & \\ \cdots\cdots & 1/\mathbf{z} & \cdots\cdots & -1/\mathbf{z} & \cdots\cdots \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots\cdots & -1/\mathbf{z} & \cdots\cdots & 1/\mathbf{z} & \cdots\cdots \\ & \vdots & & \vdots & \end{array}\right] \end{array} \qquad [8.58]$$

وكل العناصر الباقية ستكون صفراً. اذا اخترنا α لتكون $1/\mathbf{z}$ و $\mathbf{H} = \mathbf{G}$ فان الأخيرة ستكون متجهات عمودية مع العنصر $f = 1$ والعنصر $k = -1$ وكل العناصر الباقية ستكون صفراً. (على الطالب ان يثبت بنفسه ان هذه الظروف تحقق فعلاً [8.58]).

$\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}$ تعطي متجهاً عمودياً كل عنصر فيه يتألف من عنصر من عمود f ناقصاً العنصر المناظر من عمود k من $\mathbf{Y}^{-1}$

$\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}$ تعطي متجهاً سطرياً كل عنصر فيه يتألف من عنصر من صف f ناقصاً العنصر المناظر من صف k من $\mathbf{Y}^{-1}$

$\mathbf{H}_t\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{G}$ تعطي مجموع العناصر $ff+kk-fk-kf$ من $\mathbf{Y}^{-1}$ (يرمز لها بـ $\mathbf{Y}_{ff}^{-1}$ ... الخ).

وبذلـك

$$\mathbf{Y}_m^{-1} = \mathbf{Y}^{-1} - \frac{(\text{column}\, f - \text{column}\, k \text{ of } \mathbf{Y}^{-1})\,(\text{row}\, f - \text{row}\, k \text{ of } \mathbf{Y}^{-1})}{\mathbf{z} + \mathbf{Y}_{ff}^{-1} + \mathbf{Y}_{kk}^{-1} - \mathbf{Y}_{fk}^{-1} - \mathbf{Y}_{kf}^{-1}} \qquad [8.59]$$

8.6.3 تطبيق على تغيير مأخذ محول

APPLICATION TO TRANSFORMER TAP CHANGING

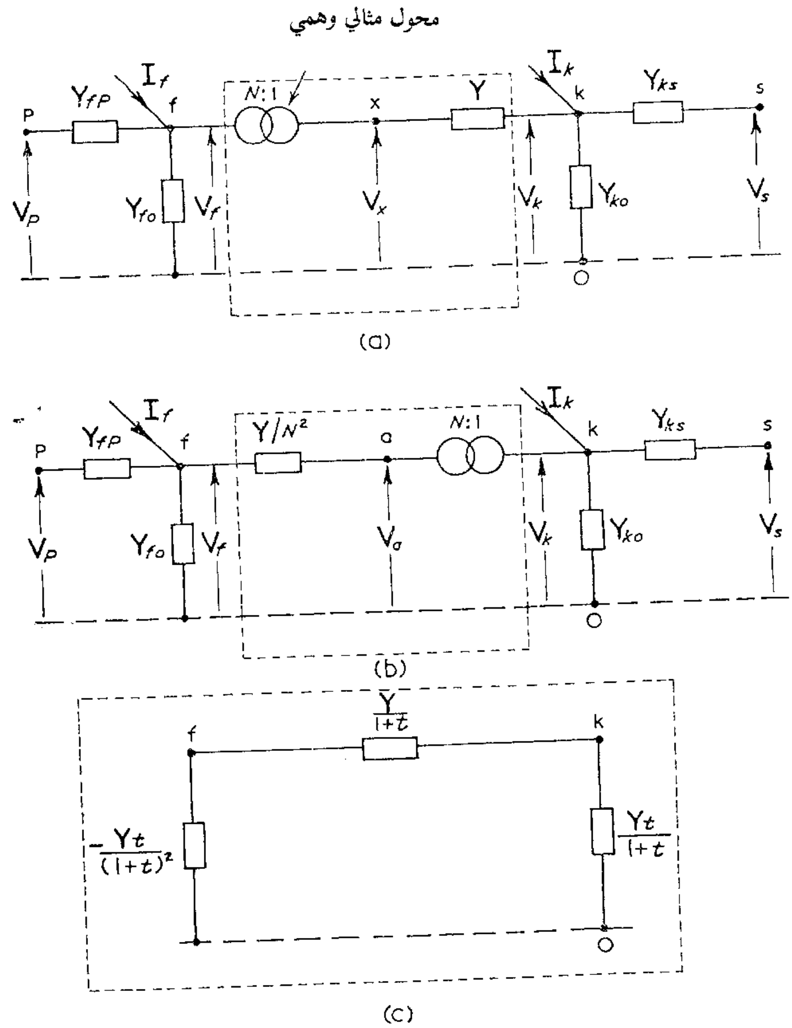
لقد تم في الملحق 1 من الجزء الأول التوضيح أنه عندما تكون الفولتيات على طرفي محول ذي ملفين هي الفولتيات الأساس (المقننة أو الأسمية) ، فان الممانعة المتوالية بنسبة الوحدة Z وبذلك المسامحة المتوالية بنسبة الوحدة $\mathbf{Y} = 1/\mathbf{Z}$ لمجموعة ملفات الأبتدائي والثانوي ستكون لها القيمة نفسها على كلا طرفي المحول. المسامحة المتوالية

المصاحبة للتمغنط والمفاقيد الحديدية يمكن اهمالها في أغلب دراسات منظومات القدرة .

من ناحية ثانية فان بعض محولات القدرة لها نسبة يمكن تغييرها من القيمة الأسمية بنسبة حوالي $\pm 10\%$ (المأخذ بنسبة الوحدة $t = \pm 0{\cdot}1$) بوساطة تغيير المأخذ لحالة اللاحمل وحالة الحمل (الفقرة 6.7 ، الجزء 1) . تغير الممانعة المتوالية مع موقع المأخذ يجب ان يكون أقل مايمكن في التصميم ويمكننا اهماله هنا . ويمكن تمثيل محول ذي مأخذ متغير بمسامحته المتوالية بنسبة الوحدة $\mathbf{Y}$ للميكا فولت أمبير الأساس المختار وللنسبة الأسمية . على التوالي مع محول مثالي وهمي عندما يكون له مأخذ بنسبة الوحدة t فان نسبة عدد اللفات بنسبة الوحدة هي $N:1$ حيث ان $N = 1+t$. شكل 8.6 (أ) يبين ذلك حيث ان مسامحة محول القدرة الذي يربط العقدتين f و k قد بينت على الجانب عديم المأخذ كما وتم وضع عقدة اضافية موقتة x . القيمة الأساس (1·0 بنسبة الوحدة) للفولتية نسبةً الى العقدة المرجع 0 (الأرض) للعقدة x تتصل بالفولتية الأساس (1·0 بنسبة الوحدة) للعقدة k عندما يعبر عنهما كليهما بالـ kV بنسبة عدد اللفات الأسمية ، والممانعة بنسبة الوحدة تكون هي نفسها عند أي من هاتين الفولتيتين . من جهة اخرى ، اذا تم نقل الممانعة الى جانب المحول ذي المأخذ فان قيمتها الأومية ستكون N^2 مضروبة في القيمة المناظرة الى مستوى الفولتية عند x وقيمتها بنسبة الوحدة ستكون $N^2\mathbf{Z}$. وهذا لأن الممانعة بنسبة الوحدة تتناسب طردياً مع الميكافولت أمبير الأساس والممانعة الأومية وتتناسب عكسياً مع (فولتية الخط الأساس kV^2) (انظر الفقرة [م 1.5] من الجزء 1) والفولتيات الأساس عند x و f ستكون هي نفسها بينما ستختلف الممانعات الأومية بالعامل N^2 . تبعاً لذلك ستكون المسامحة بنسبة الوحدة الممثلة على الجانب ذي المأخذ هي $\mathbf{Y}/N^2$ وستظهر عقدة مساعدة جديدة مؤقتة a كما مبين في شكل 8.6 (ب) .

يمكننا ان نرى من الشكل 8.6 (أ) بأنه بتطبيق [14 و 8] على العقدة k على الجانب العديم المأخذ سنحصل على

$$\mathbf{I}_k = (\mathbf{Y}+\mathbf{Y}_{ks}+\mathbf{Y}_{k0})\mathbf{V}_k - \mathbf{Y}\mathbf{V}_x - \mathbf{Y}_{ks}\mathbf{V}_s$$



شكل (8.6) تغير مأخذ المحول
(أ) تمثيل المسامحة المتوالية على الجانب عديم المأخذ
(ب) تمثيل المسامحة المتوالية على الجانب ذي المأخذ
(ج) دائرة (π) المكافئة

وبما ان

$$\mathbf{V}_x = \mathbf{V}_f/N$$

$$\mathbf{I}_k = (\mathbf{Y}+\mathbf{Y}_{ks}+\mathbf{Y}_{k0})\mathbf{V}_k - \mathbf{Y}\mathbf{V}_f/N - \mathbf{Y}_{ks}\mathbf{V}_s$$

وبذلك فان المسامحة الذاتية العقدية عند العقدة التي على الجانب العديم المأخذ من المحولة ستحتوي على مسامحتها المتوالية الأعتيادية بينما ستكون المسامحة التبادلية العقدية بين العقد على أي جانب منها هي $\mathbf{Y}/N = \mathbf{Y}/(1+t)$
وبتدقيق الشكل 8.6 (ب) يمكننا كتابة [8.14] للعقدة f على الجانب ذي المأخذ كما يلي

$$\mathbf{I}_f = (\mathbf{Y}/N^2 + \mathbf{Y}_{fp} + \mathbf{Y}_{f0})\mathbf{V}_f - \mathbf{Y}\mathbf{V}_a/N^2 - \mathbf{Y}_{fp}\mathbf{V}_p$$

وبما ان

$$\mathbf{V}_a = N\mathbf{V}_k$$

$$\mathbf{I}_f = (\mathbf{Y}/N^2 + \mathbf{Y}_{fp} + \mathbf{Y}_{f0})\mathbf{V}_f - \mathbf{Y}\mathbf{V}_k/N - \mathbf{Y}_{fp}\,\mathbf{V}_p$$

ستكون المسامحة الذاتية العقدية على الجانب ذي المأخذ تبعاً لذلك هي $\mathbf{Y}/N^2 = \mathbf{Y}/(1+t)^2$ هذه المسامحات العقدية تبين ان المحول ذا المأخذ المتغير يمكن تمثيله بصورة عامة بدائرة π المكافئة المبينة في شكل 8.6 (ج) والتي ستقل الى المسامحة المتوالية فقط عند النسبة الأسمية. هذه المسامحات العقدية ستظهر في مصفوفة المسامحة العقدية كما يلي :

$$\begin{array}{c} \\ f \\ \\ k \\ \\ \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccc} & f & & k & \end{array} \\
\left[\begin{array}{ccccc}
 & \vdots & & \vdots & \\
\cdots & \dfrac{\mathbf{Y}}{(1+t)^2} & \cdots & \dfrac{-\mathbf{Y}}{(1+t)} & \cdots \\
 & \vdots & & \vdots & \\
\cdots & \dfrac{-\mathbf{Y}}{(1+t)} & \cdots & \mathbf{Y} & \cdots \\
 & \vdots & & \vdots &
\end{array}\right]
\end{array}$$

وبذلك فان مصفوفة التحوير التي نحتاجها للأنتقال من مأخذ بنسبة الوحدة t_1 الى مأخذ t_2 ستكون

$$
\alpha\, \mathbf{GH}_t = \begin{array}{c} \\ f \\ \\ k \\ \\ \end{array}\begin{bmatrix} & \overset{f}{\vdots} & & \overset{k}{\vdots} & \\ \cdots & Y\left(\frac{1}{(1+t_2)^2}-\frac{1}{(1+t_1)^2}\right) & \cdots & Y\left(\frac{1}{(1+t_1)}-\frac{1}{(1+t_2)}\right) & \cdots \\ & \vdots & & \vdots & \\ \cdots & Y\left(\frac{1}{(1+t_1)}-\frac{1}{(1+t_2)}\right) & \cdots\cdots & 0 & \cdots\cdots \\ & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix}
$$

مثـال محلـول *8.4* :

في شبكة المثال المحلول 8.1 يتم ربط حمل آخر ذي ممانعة j0·6 بنسبة الوحدة الى العقدة 2 . جد مصفوفة الممانعة العقدية الجديدة باستعمال صيغة معادلة كرون وحقق النتيجة بكتابة مصفوفة المسامحة الجديدة ومن ثم اعكسها

الحـــل :-

من حل المثال المحلول 8.3 ، يكون معكوس مصفوفة المسامحة الأصلية هو

$$
[\mathbf{Y}]^{-1} = \frac{j}{600}\begin{bmatrix} 33\cdot 5 & 20 \\ 20 & 29\cdot 92 \end{bmatrix} = j\begin{bmatrix} 0\cdot 0558 & 0\cdot 0333 \\ 0\cdot 0333 & 0\cdot 0499 \end{bmatrix}
$$

ومن [*8.57*] فان المصفوفة التي يجب ان تطرح من $[\mathbf{Y}]^{-1}$ لكي تعطينا $\mathbf{Y}_m^{-1}$ هي

$$
\frac{\left(\frac{j}{600}\right)^2\begin{bmatrix} 20 \\ 29\cdot 92 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 20 & 29\cdot 92 \end{bmatrix}}{j0\cdot 6+\frac{j29\cdot 92}{600}}
$$

$$
= j\begin{bmatrix} 0\cdot 00176 & 0\cdot 00264 \\ 0\cdot 00264 & 0\cdot 00394 \end{bmatrix}
$$

ولذلك فان طرح هذه من $[Y]^{-1}$ سيعطينا

$$[Y_m]^{-1} = j\begin{bmatrix} 0{\cdot}05404 & 0{\cdot}03066 \\ 0{\cdot}03066 & 0{\cdot}04596 \end{bmatrix}$$

(يجب ان يلاحظ ان هذه القيم تم الحصول عليها بوساطة المسطرة الحاسبة المنزلقة وعلى الطالب ان ينتبه الى ان هذه سوف لاتكون كافية للتعامل مع مثل هذه الفروقات الصغيرة التي هي نموذجية في تحليلات الفولتيات العقدية ، والتي سوف لاتسبب أية مشكلة نهائياً عند استعمال الحاسبة الرقمية) .

8.7 الطرق التكرارية Iterative methods

الطرق التكرارية تصنف على انها تلك التي يمكن ان تحل [*8.20*] و[*8.29*] معاً لكي نحصل على الفولتيات بوساطة التقريب المتتابع . وهذه ستكون مغايرة للطرق المباشرة (التي تمت مناقشتها في الفقرة 8.5) حيث ان المعادلات التي تم حلها معاً هي [*8.32*] و[*8.29*] .

سيكون نطاق هذا الكتاب التعامل مع طريقتين تكراريتين فقط من الطرق التكرارية الموجودة . وقد تم اختيار المباديء الأساسية لطريقتي كاوس – سايدل (Gauss–Seidel) ونيوتن رافسون (Newton–Raphson) لتوضيح الطرق التكرارية . هناك تحسينات وتغييرات في هذه الطرق كما هو الحال في الطرق الأخرى ولكن ذلك سوف لايكون ضمن نطاق الكتاب الحالي سرد للطرق المتعلقة بهذا الموضوع يمكن للقاريء ان يرجع الى كتاب (Laughton and Humphrey Davies 1964) وكتاب (Stagg and 1969, El-Abiad) .

8.7.1 طريقة كاوس – سايدل GAUSS–SEIDEL METHOD

عند أية عقدة r حيث قد تم تعيين القدرة المركبة S_r الداخلة او الخارجة من الشبكة منذ البداية (انظر الفقرة 8.4) ، فعند استعمال [*8.31*] (التي قد حصلنا عليها من $[I] = [Y][V]$ و $S_r = V_r I_r^*$) يجب تبعاً لذلك ان يكون الحل النهائي لفولتيات قضبان التوزيع متطابق مع

$$\sum_{k=1}^{n} \mathbf{Y}_{rk}^{*}\mathbf{V}_{k}^{*} = \frac{\mathbf{S}_r}{\mathbf{V}_r} \qquad [8.60]$$

حيث ان n هي العدد الكلي للعقد ماعدا العقدة المرجع. مجموعة معادلات مشابهة للمعادلة [8.60] لكل العقد التي تم تعيين قدرتها المركبة لمسألة سريان القدرة المعطاة يمكن ان تكتب بنمط مصفوفة كالآتي

$$[\mathbf{Y}^*][\mathbf{V}^*] = [\mathbf{B}] \qquad [8.61]$$

والتي يمكن كتابتها، على اساس ان $[\mathbf{Y}^*]$ هي غير انفرادية، كما يلي

$$[\mathbf{V}^*] = [\mathbf{Y}^*]^{-1}[\mathbf{B}]$$

$[\mathbf{Y}^*]$ يمكن كتابتها كمجموع جبري لمصفوفات ثلاث

$$[\mathbf{Y}^*] = [\mathbf{D}] - [\mathbf{L}] - [\mathbf{T}]$$

حيث ان $[\mathbf{D}]$ هي مصفوفة قطرية $[\mathbf{Y}^*]$ يمكن أن نفترض انها تتكون من عناصر مركبة محدودة. $[\mathbf{L}]$ و $[\mathbf{T}]$ هما مصفوفتاها المثلثيتان السفلى والعليا (مع تغيير علامات العناصر).

[8.61] ستصبح الآن

$$[\mathbf{D}][\mathbf{V}^*] = ([\mathbf{L}]+[\mathbf{T}])[\mathbf{V}^*]+[\mathbf{B}] \qquad [8.62]$$

بحيث ان

$$[\mathbf{V}^*] = [\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{L}][\mathbf{V}^*]+[\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{T}][\mathbf{V}^*]+[\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{B}] \qquad [8.63]$$

وعند تطبيق طريقة كاوس-سايدل (او طريقة الأزاحات المتتابعة) على [8.63] ستكون

$$[\mathbf{V}^*]^{p+1} = [\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{L}][\mathbf{V}^*]^{p+1}+[\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{T}][\mathbf{V}^*]^{p}+[\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{B}] \qquad [8.64]$$

حيث الرمز العلوي p يشير الى رقم الدورة التكرارية وليس الى كونه أساً. مع استعمال عناصر $[V^*]^{p+1}$ بدلاً من عناصر $[V^*]^p$ التي تم الحصول عليها في الدورة السابقة حالما يتم حسابها ، وكل دورة تكرارية تماثل ازاحة واحدة لكل عنصر. (يمكن ان نرى ذلك بصورة اوضح بعد ان نحصل على المعادلات ذات العلاقة [8.68] و [8.69] و [8.70] التي ستأتي فيما بعد).

اذا كانت هناك ثلاث عقد 1 و 2 و 3 تم تعيين القدرة المركبة لكل منها من البداية فان تدقيق [8.23] يبين لنا ان

$$[D]^{-1} = \frac{1}{Y_{11}^* Y_{22}^* Y_{33}^*}\begin{bmatrix} Y_{22}^* Y_{33}^* & 0 & 0 \\ 0 & Y_{11}^* Y_{33}^* & 0 \\ 0 & 0 & Y_{11}^* Y_{22}^* \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1/Y_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & 1/Y_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & 1/Y_{33}^* \end{bmatrix} \qquad [8.65]$$

$$[D]^{-1}[L] = \begin{bmatrix} 1/Y_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & 1/Y_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & 1/Y_{33}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -Y_{21}^* & 0 & 0 \\ -Y_{31}^* & -Y_{32}^* & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D]^{-1}[L] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -Y_{21}^*/Y_{22}^* & 0 & 0 \\ -Y_{31}^*/Y_{33}^* & -Y_{32}^*/Y_{33}^* & 0 \end{bmatrix} \qquad [8.66]$$

وبالطريقة نفسها

$$[D]^{-1}[T] = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{12}^*/Y_{11}^* & -Y_{13}^*/Y_{11}^* \\ 0 & 0 & -Y_{23}^*/Y_{22}^* \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad [8.67]$$

والصيغة العامة لكل حد من $[D]^{-1}[B] = S_r/Y_{rr}^* V_r$. وبتعويض هذه النتيجة مع تلك التي في [8.65] و [8.66] و [8.67] في [8.64] سيكون :

$$V_1^{*p+1} = -\frac{Y_{12}^*}{Y_{11}^*} V_2^{*p} - \frac{Y_{13}^*}{Y_{11}^*} V_3^{*p} + \frac{S_1}{Y_{11}^*} \frac{1}{V_1^p} \qquad [8.68]$$

$$V_2^{*p+1} = -\frac{Y_{21}^*}{Y_{22}^*} V_1^{*p+1} - \frac{Y_{23}^*}{Y_{22}^*} V_3^{*p} + \frac{S_2}{Y_{22}^*} \frac{1}{V_2^p} \qquad [8.69]$$

$$V_3^{*p+1} = -\frac{Y_{31}^*}{Y_{33}^*} V_1^{*p+1} - \frac{Y_{32}^*}{Y_{33}^*} V_2^{*p+1} + \frac{S_3}{Y_{33}^*} \frac{1}{V_3^p} \qquad [8.70]$$

وبتدقيق المعادلات[8.68] و [8.69] و [8.70] يتبين لنا كيف سنستعمل القيم الجديدة التي حصلنا عليها في معادلة واحدة مباشرة في المعادلة التالية ؛ مثلاً المعادلة [8.69] تستعمل القيمة الجديدة للفولتية V_1^{*p+1} التي حصلنا عليها من [8.68] ، المعادلة [8.70] تستعمل V_2^{*p+1} من [8.69] وهكذا تستمر الى حين اكمال دورة تكرارية واحدة . وهي في هذه الحالة البسيطة تصحيح لكل من الفولتيات الثلاث فقط) .

المعادلات [8.68] و[8.69] و[8.70] تطبق على العقد التي تم تعيين القدرة المركبة لها عند البداية وهذه قد تكون العقد التي تم ربط حمل عليها .

اذا اخذنا عقدة ما g (ربما عقدة توليد) تم تحديد $|V_g|$ و P_g عليها (ربما مع وضع حدود على Q_g) فعندئذ P_g+jQ_g يمكن ان تكتب بدلاً عن S_g في المعادلة المناسبة مثلاً اذا اخذنا المثال ذا الثلاث عقد أعلاه . فان العقدة 2 هي عقدة توليد ذات $|V_2|$ و P_2 معينة ويجب ايجاد Q_2 غير المعلومة . عندئذ

$$V_2^{*p+1} = \frac{-Y_{21}^*}{Y_{22}^*} V_1^{*p+1} - \frac{Y_{23}^*}{Y_{22}^*} V_3^{*p} + \frac{P_2}{Y_{22}^*} \frac{1}{V_2^p} + \frac{jQ_2}{Y_{22}^*} \frac{1}{V_2^p} \qquad [8.71]$$

وبكتابة $(V_2^{*p+1})'$ بدلا من مجموع الحدود الثلاثة الاولى التي على الطرف الايمن من [8.71] نحصل على

$$V_2^{*p+1} = (V_2^{*p+1})' + j\frac{Q_2}{Y_{22}^*} \frac{1}{V_2^p}$$

لذلك . بصورة عامة لاية عقدة g ذات $|V_g|$ و P_g معينة يمكن ان نقول

$$V_g^{*p+1} = (V_g^{*p+1})' + j \frac{Q_g}{Y_{gg}^*} \frac{1}{V_g^p} \qquad [8.72]$$

والتقريب الممكن الوحيد الذي يمكن تطبيقه اذا لم يتم تعيين Q_g هو اضافة الحد الثاني من الطرف الايمن للمعادلة [8.72] الحاوي على القيمة المخمنة لـ Q_g الى الحد الاول وكأنهما منطبقاً الطور ثم تغيير مقداري مركبتي V_g^{*p+1} عن طريق ضربهما بنسبة بحيث تجعل $|V_g^*| = |V_g^{*p+1}|$. وهكذا يتم اعادة تعيير مقادير الفولتيات عند قضبان التوليد الى القيم المعينة الصحيحة في كل دورة تكرارية .

بما ان مقدار وزاوية طور الفولتية عند قضيب التوزيع الطافي تم تعينهما منذ البداية فسوف لانحتاج الى اية معادلة لحسابهما والدورة التكرارية ستتعامل مع كل من الفولتيات الاخرى فقط حسب دورها بينما تبقى فولتية قضيب التوزيع الطافي ثابتة في المقدار والطور في كل معادلة تظهر فيها .

8.7.2 طريقة نيوتن رافسون NEWTON–RAPHSON METHOD

اذا كانت القدرة المركبة $\bar{S}_r = \bar{P}_r + j\bar{Q}_r$ معينة عند اي عقدة r منذ بداية دراسة سريان الحمل فان الاختلاف بين هذه القيمة والقدرة المركبة المخمنة عند اي مرحلة من العملية التكرارية يمكن ان تكتب من المعادلة [8.60] كما يلي :

$$\Delta S_r = \bar{S}_r - V_r \sum_{k=1}^{n} Y_{rk}^* V_k^* \qquad [8.73]$$

اذا كانت $V_r = e_r + jf_r$ وعند الدورة التكرارية المرقمة p كانت

$$\Delta S_r^p = \Delta P_r^p + j\Delta Q_r^p$$

فبأستعمال نظرية تايلور (Taylor's theorem) نحصل على

$$\Delta S_r^p = \left(\frac{\partial P_r}{\partial e_r} + j\frac{\partial Q_r}{\partial e_r}\right)^p \Delta e_r^p + \left(\frac{\partial P_r}{\partial f_r} + j\frac{\partial Q_r}{\partial f_r}\right)^p \Delta f_r^p \qquad [8.74]$$

واذا كان هناك قضبان توزيع عددها n فعند قضيب التوزيع $(n-1)$ تكون القـــدرة الحقيقية $\bar{P}_r$ معينة والقدرة المتفاعلة $\bar{Q}_r$ معينة اما بصورة محددة او بوصفها قيمة عظمى ولــكن تكون مركبتا الفولتية e_r و f_r غير معلومتين. وعند قضيب التوزيع الذي هــو قضيب التوزيع الطافي يتم تعيين مركبتي الفولتية ولــكن القدرة المركبة تكون غير معلومة. وبذلك ستكون في طريقة نيوتن رافسون معادلات عددها $2(n-1)$ من نوع المعادلة [8.74] يجب حلها وهذه المعادلات يمكــن كتابتها بالصيغة التالية

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \hline \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \partial P_1/\partial e_1 & \cdots\cdots & \partial P_1/\partial e_{n-1} & \partial P_1/\partial f_1 & \cdots\cdots & \partial P_1/\partial f_{n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \partial P_{n-1}/\partial e_1 & \cdots & \partial P_{n-1}/\partial e_{n-1} & \partial P_{n-1}/\partial f_1 & \cdots & \partial P_{n-1}/\partial f_{n-1} \\ \hline \partial Q_1/\partial e_1 & \cdots\cdots & \partial Q_1/\partial e_{n-1} & \partial Q_1/\partial f_1 & \cdots\cdots & \partial Q_1/\partial f_{n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \partial Q_{n-1}/\partial e_1 & \cdots & \partial Q_{n-1}/\partial e_{n-1} & \partial Q_{n-1}/\partial f_1 & \cdots & \partial Q_{n-1}/\partial f_{n-1} \end{array}\right] \times \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \hline \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \qquad [8.75]$$

وبصورة اكثر اختصارا كما يلي

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Delta P} \\ \hline \mathbf{\Delta Q} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \hline \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{\Delta e} \\ \hline \mathbf{\Delta f} \end{bmatrix}$$

ان عناصر مصفوفة المعاملات (تعرف بالجاكوبيان) في [8.75] يمكن ان تحدد من معادلات القدرة لقضبان التوزيع . ويكفي لعرضنا الموجز هذا ان نوضح عناصر المصفوفة [J_1] فقط . ولتعامل تفصيلي اكثر والمراجع في دراسات سريان الحمل باستعمال هذه الطريقة، يمكن للقاريء ان يرجع الى كتاب Laughton and Humphrey Davies 1964 وكتاب Stagg and El-Abiad, 1968

بكتابة $Y_{rk} = G_{rk}+jB_{rk}$ القدرة الجارية عند قضيب التوزيع r في اية لحظة من العملية التكرارية ، التي عند تقليل ΔS_r الى صفر ستصبح في النهاية مساوية لـ $\bar{P}_r+j\bar{Q}_r$ يمكن كتابتها من المعادلة [8.60] كما يلي :

$$P_r+jQ_r = (e_r+jf_r)\sum_{k=1}^{n}(G_{rk}-jB_{rk})(e_k-jf_k)$$

وبذلك

$$P_r = \sum_{k=1}^{n}\{e_r(e_kG_{rk}-f_kB_{rk})+f_r(e_kB_{rk}+f_kG_{rk})\} \qquad [8.76]$$

$$Q_r = \sum_{k=1}^{n}\{f_r(e_kG_{rk}-f_kB_{rk})-e_r(e_kB_{rk}+f_kG_{rk})\} \qquad [8.77]$$

ومن المعادلة [8.76] يمكن ان نحصل على

$$P_r = e_r(e_rG_{rr}-f_rB_{rr})+f_r(e_rB_{rr}+f_rG_{rr}) + \sum_{\substack{k=1\\k\neq r}}^{n}\{e_r(e_kG_{rk}-f_kB_{rk})+f_r(e_kB_{rk}+f_kG_{rk})\}$$

العناصر غير الصفرية من المصفوفة [J_1] عندما $k \neq r$ هي

$$\frac{\partial P_r}{\partial e_k} = e_rG_{rk}+f_rB_{rk} \qquad [8.78]$$

والعناصر القطرية من المصفوفة [J_1] ستكون

$$\frac{\partial P_r}{\partial e_r} = 2e_rG_{rr}-f_rB_{rr}+f_rB_{rr}+\sum_{\substack{k=1\\k\neq r}}^{n}(e_kG_{rk}-f_kB_{rk})$$

هذا التعبير الرياضي يمكن تبسيطه بتعويض الجزء الحقيقي c_r من التيار عند قضيب التوزيع r وكما يلي

$$I_r = c_r+jd_r = (G_{rr}+jB_{rr})(e_r+jf_r)+\sum_{\substack{k=1\\k\neq r}}^{n}(G_{rk}+jB_{rk})(e_k+jf_k) \qquad [8.79]$$

بحيث ان

$$\frac{\partial P_r}{\partial e_r} = e_r G_{rr} + f_r B_{rr} + c_r \qquad [8.80]$$

كما يمكن ان نحصل على عناصر المصفوفات [J_2] و[J_3] و[J_4] باتباع الطريقة نفسها . هناك صور مختلفة عديدة لطريقة نيوتن رافسون ولكن يمكن اجمالها بصورة عامة بالخطوات التالية :

(أ) حدد القيم التخمينية البدائية لفولتيات قضبان التوزيع .
(ب) أحسب P_r و Q_r لكل قضيب توزيع من المعادلتين [8.76] و[8.77] .
(ج) أحسب ΔQ_r و ΔP_r من المعادلة [8.73] .
(د) أحسب عناصر مصفوفة المعادلات [8.75] باستعمال معادلات مثل المعادلتين [8.78] و[8.80] باستعمال مركبات تيارات قضبان التوزيع من المعادلة [8,79] (باستعمال الفولتيات المخمنة والقدرة المحسوبة) او بأية طريقة اخرى .
(هـ) جد Δe_r و Δf_r من المعادلة [8.75] .
(و) باستعمال هذه القيم ، حور الفولتيات عند كل قضبان التوزيع وابدأ الدورة التكرارية التالية من الخطوة (ب) .
(ز) استمر في الحل حتى تكون ΔP_r^p و ΔQ_r^p لكل قضبان التوزيع ضمن الفرق الصغير جداً المعين المسموح به .

8.7.3 التقارب وعوامل التعجيل

CONVERGENCE AND ACCELERATION FACTORS

يمكننا توفيروقت الحاسبة اذا استعملنا بعض الوسائل لتقليل عدد الدورات التكرارية المأخوذة للحصول على التقارب المطلوب . وقد تم ايجاد عدة طرق لتعجيل العملية التكرارية بحيث يمكن الحصول على التقارب بصورة اسرع .

احدى الطرق الشائعة للتعجيل هي ضرب كلتا المركبتين الحقيقية والخيالية للفرق في الفولتية بين دورة تكرارية واحدة والتي تليها بعامل التعجيل نفسه . باستعمال فولتية مخمنة V^p خلال الدورة التكرارية ($p+1$) لأية طريقة مثل طريقة كاوس – سايدل ستعطينا

فولتية مخمنة جديدة $(\mathbf{V}^{p+1})'$. اذا استعملنا الآن عامل تعجيل ω فان الفولتية المستعملة في الدورة التكرارية التالية $p+2$ ستكون $\mathbf{V}^{p+1}$ بدلاً من $(\mathbf{V}^{p+1})'$ حيث

$$(\mathbf{V}^{p+1}) = \mathbf{V}^p + \omega((\mathbf{V}^{p+1})' - \mathbf{V}^p) \qquad [8.81]$$

ان استعمال ω مقتصر لحد الان على القيم الحقيقية ويكون بحدود 1.6 .
اذا عجلنا طريقة كاوس – سايدل (الفقرة 8.7.1) فان تقارب معادلات مثل [8.68] و [8.69] و [8.70] يمكن ان يعجل بتطبيق [8.64] و [8.81] فنحصل على :

$$[\mathbf{V}^*]^{p+1} = [\mathbf{V}^*]^p + \omega([\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{L}][\mathbf{V}^*]^{p+1} + [\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{T}][\mathbf{V}^*]^p + [\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{B}] - [\mathbf{V}^*]^p) \qquad [8.82]$$

وبكتابة المعادلة [8.82] بالصيغة

$$[\mathbf{V}^*]^{p+1} = [\mathbf{H}][\mathbf{V}^*]^p + [\mathbf{M}][\mathbf{D}]^{-1}[\mathbf{B}]$$

يمكننا ان نبين (Laughton and Humphrey Davies, 1964) بان عامل التعجيل الامثل يمكن ان يتحدد بدلالة قيم آيكن (القيم الذاتية) (انظر الملحق م . 1.10) للمصفوفة التكرارية [H] .

8.7.4 الطرق الهجينة HYBRID METHODS

اذا جزأنا معادلة المسامحة العقدية [8.20] للشبكة لكي تعطينا

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \hline \mathbf{I}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{aa} & \mathbf{Y}_{ab} \\ \hline \mathbf{Y}_{ba} & \mathbf{Y}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \hline \mathbf{V}_b \end{bmatrix} \qquad [8.83]$$

فأن

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{Y}_{aa}\mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_{ab}\mathbf{V}_b \qquad [8.84]$$

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{Y}_{ba}\mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_{bb}\mathbf{V}_b \qquad [8.85]$$

ومن [8.85]

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{Y}_{bb}^{-1}\mathbf{I}_b - \mathbf{Y}_{bb}^{-1}\mathbf{Y}_{ba}\mathbf{V}_a \qquad [8.86]$$

وبتعويض هذا في [8.84] ستعطينا مع [8.86] مايلي

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ -- \\ \mathbf{V}_b \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} (\mathbf{Y}_{aa} - \mathbf{Y}_{ab}\mathbf{Y}_{bb}^{-1}\mathbf{Y}_{ba}) & \mathbf{Y}_{ab}\mathbf{Y}_{bb}^{-1} \\ \hline -\mathbf{Y}_{bb}^{-1}\mathbf{Y}_{ba} & \mathbf{Y}_{bb}^{-1} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ -- \\ \mathbf{I}_b \end{bmatrix} \qquad [8.87]$$

المصفوفة في [8.87] التي تصل تيارات وفولتيات المنظومة هي مصفوفة مختلطة تتألف من عناصر ممانعة وعناصر مسامحة وعناصر ليس لها أبعاد . بهذه الطريقة يمكن استعمال الطريقة الهجينة ، اي احداها توحد الطرق المباشرة لتكون المصفوفة المعكوسة $\mathbf{Y}_{bb}^{-1}$ ، تتبعها طريقة تكرارية للحصول على الحل .

8.8 التقطيع Tearing

كما ذكرنا في نهاية فقرة المقدمة 8.4. بأن الطرق المباشرة قدتكون ذات مساوىء مقارنة مع الطرق التكرارية لحل معادلات شبكات القدرة الكبيرة . وهذا يكون بسبب الوقت المستغرق في عكس مصفوفة مسامحة كبيرة ومجال الخزن الكبير الذي نحتاجه وبذلك يكون حجم وسرعة الحاسبة مسألة حيوية في اختيار طريقة الحل . لتقليل زمن الحاسبة ومجال الخزن بحيث انه اضافة الى محاسن هذه التقليصات يمكننا حل مسائل ذات معادلات اكثر بدون حاسبة سريعة وكبيرة . يمكننا استعمال طرق الدايكوبتك (diakoptics) او التقطيع التي أوجدها كرون (Kron) . واستعمال التقطيع في حل مسائل منظومات القدرة تمت دراسته وتقويمه من قبل بعض الباحثين في السنين الأخيرة (مثلا Brammeller, 1964 و Day and Parton, 1965) .

التقطيع يتألف بصورة أساسية من تقسيم منظومة القدرة الى عدد من الشبكات المركبة وعكس مصفوفات مسامحة هذه الشبكات الصغيرة او الثانوية بصورة منفصلة ثم الحصول على الحل لكل المنظومة باستعمال مصفوفات رابطة . ان التقطيع ليس هو البديل للطرق الأخرى للحل ولكنه امتداد لها ويمكن استعماله عندما تصبح الطرق الأخرى غير مرضية بسبب التحديدات في الحاسبات المتوفرة . وحيث ان العديد من منظومات القدرة تتألف من مراكز حمل وتوليد مترابطة فيما بينها بخطوط نقل قليلة نسبيا فانها تكون مناسبة لتقنية التقطيع حيث يجب ان يكون عدد الفروع المقطوعة أقل بكثير من العدد الكلي لعقد المنظومة كما سيبين بالمقارنة التالية للأزمنة اللازمة للحسابات .

بما ان الوقت المستغرق لعكس مصفوفة يتناسب مع n^3 تقريباً حيث ان n هي عدد العقد فان تقطيع الشبكة الى شبكات ثانوية عددها N سيتضمن عكس مصفوفات عددها N وكل منها ستستغرق زمناً يساوي تقريباً $1/N^3$ من الزمن T الذي نحتاجه لعكس مصفوفة الشبكة الكاملة . وبذلك اذا كان هناك خطوط عددها m وتم تقطيعها لتكون شبكات ثانوية عددها N فان الزمن t المستغرق في عملية العكس باستعمال التقطيع تم اعطاؤه من قبل Brameller, 1964 وكما يلي

$$t \simeq (1/N^2 + m/n)T \qquad [8.88]$$

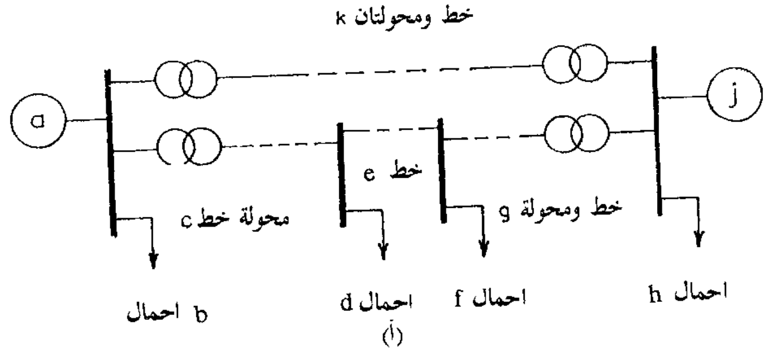
ولذلك فانه كلما كان عدد الخطوط المقطوعة أقل نسبة الى العدد الكلي للعقد كانت تقنية التقطيع أكثر اقتصادية بالنسبة للزمن المستغرق لعملية العكس . وتأثير الحد m/n هو لجعل t تتجاوز T/N^2 وقد تكون في بعض الحالات عالية الى حد بحيث تكون بين $2T/N^2$ و $3T/N^2$. والحد المشتمل على عدد الخطوط المقطوعة m يظهر في [8.88] لأن المجاهيل الجديدة (معناه تيارات الخط المقطوع) تظهر عند كل تقطيعة والمتجه العمـودي للتيارات [I] يجب ان يتضمنها الآن سوية مع التيارات العقدية في المعادلات [I] = [Y][V] و [V] = [Y]$^{-1}$[I] = [Z][I]
المتجه العمودي للفولتيات ، بالتشابه ، سوف لايتضمن الفولتيات العقدية فقط ولكن الفولتيات (عادة تكون صفر) التي على التوالي مع الفروع المقطوعة أيضاً .

بما ان طريقة التجزئة أو تحليل المصفوفة المعكوسة الى العوامل ، كما بينا في الفقرة 8.5.2 ، هي احدى الطرق لتقليل رتبة المصفوفات التي تحتاج الى عكس في الطرق المباشرة للحل ، فان هناك بعض التشابه بينها وبين طريقة التقطيع . هاتان الطريقتان لذلك ستستعملان لحل مثال بسيط بعد ايجاز عملية التقطيع في الفقـرة 8.8.1 .

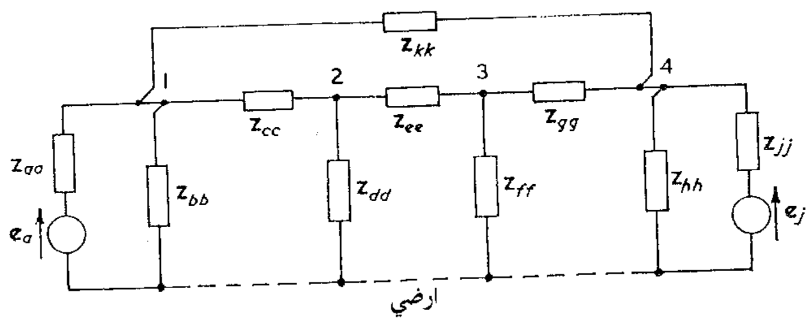
8.8.1 التطبيق البسيط للتقطيع — SIMPLE APPLICATION OF TEARING

التعامل في هذه الفقرة سيتبع الطريقة التي تبناها (1964) Brameller . شكل 8.7 يبين منظومة قدرة بسيطة ذات محطتي توليد مترابطة فيما بينها بوساطة خطوط نقل مع احمال في أماكن مختلفة . شكل 8.8 يبين المنظومة نفسها مع مساحات الفروع المناظرة والتيارات المحقونة الى المنظومة مُعلَّمة عند العقدتين 1 و 4 . شكل 8.8 كذلك يبين خطاً متعرجاً عبر المنظومة يبين مكان تقطيعها الى شبكتين ثانويتين وشكل 8.9

يبين كلاً من هاتين الشبكتين منفصلة لوحدها مع فروع الشبكة الاصلية التي أجري القطع من خلالها معزولة عن الشبكتين الثانويتين . وهكذا فهناك اربع شبكات بدائية في شكل 8.9 يمكن ان تكون لها مصفوفات مسامحة عقدية ويمكن ان نعكسها بعد ذلك . وشبكات الشكل 8.9 يجب ان تنسب (وتدعى في بعض الأحيان بالشبكة المنسوبة) الى تلك التي في شكل 8.8 بوساطة شرط عدم تغير القـدرة .



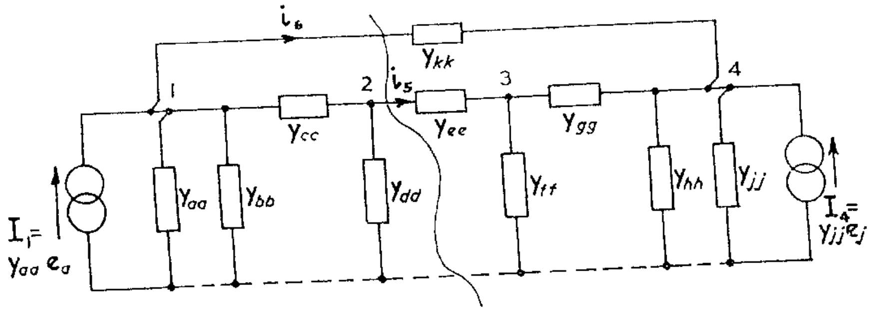
(أ)



(ب)

شكل 8.7 (أ) المنظومة

(ب) شبكة مصادر الفولتية والممانعات بنسبة الوحدة



شكل 8.8 شبكة مصادر التيار مع المسامحات بنسبة الوحدة

ستستعمل علامة فتحة علوية لكي ترمز الى الكميات في الشبكة المنسوبة او البدائية لشكل 8.9 لكي نميزها عن الكميات «عديمة الفتحة العلوية» المناظرة في منظومة القدرة الفعلية لشكل 8.7 او شكل 8.8 . التيارات العقدية الفعلية هي $\mathbf{I}_1(=\mathbf{y}_{aa}\mathbf{e}_a)$ و $\mathbf{I}_2(=0)$ و $\mathbf{I}_3(=0)$ و $\mathbf{I}_4(=\mathbf{y}_{jj}\mathbf{e}_j)$. العلاقات بين تيارات الدائرة ذات الصلة وتلك التي للمنظومة الفعلية يمكن ان يعبر عنها رياضياً بوساطة مصفوفة الربط $[\mathbf{C}']$ كمـا يـلي

$$[\mathbf{I}'] = [\mathbf{C}'][\mathbf{I}] \qquad [8.89]$$

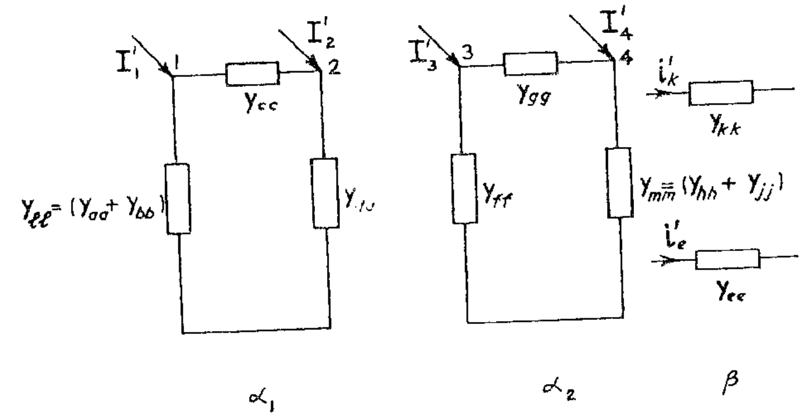
العلامة $[\mathbf{C}']$ تم استعمالها هنا بدلاً من $[\mathbf{C}]$ لأن الأخيرة تم استعمالها في الفقـرة 7.2.2 والفقرة 8.3 في تحليلات الفولتية العقدية بالضرب المسبق لمصفوفة الفولتية العقدية لكي تعطينا فولتيات الفروع للشبكة البدائية . ومصفوفة الربط $[\mathbf{C}']$ في المعادلة [8.89] تم استعمالها للسهولة لوصل التيارات المناظرة بدلاً من الفولتيات . مقارنة المعادلتين [8.89] و[7.18] تبين ان $[\mathbf{C}'] = [\mathbf{C}^*]_t^{-1}$ بحيث ان

$$[\mathbf{C}']^{-1} = [\mathbf{C}^*]_t \qquad [8.90]$$

وكذلـك

$$[\mathbf{C}'^*]_t^{-1} = [\mathbf{C}] \qquad [8.91]$$

المتجه العمودي $[\mathbf{I}]$ للتيارات في المنظومة الفعلية لشكل 8.8 يتألف من جزأين : $[\mathbf{I}_\alpha]$ الذي يحتوي على التيارات العقدية $\mathbf{I}_1$ و$\mathbf{I}_2(=0)$ و $\mathbf{I}_3(=0)$ و $\mathbf{I}_4$ ، و $[\mathbf{I}_\beta]$ الذي يحتوي على التيارات $\mathbf{i}_5$ و $\mathbf{i}_6$ الجارية في فروع الشكل 8.8 والتي سيتم قطعها بعد ذلك لتشكل المنظومة البدائية لشكل 8.9 . وبالتشابه فان المتجه العمودي $[\mathbf{I}']$ للتيارات في المنظومة البدائية يتألف من جزأين $[\mathbf{I}_\alpha]$ و$[\mathbf{I}_\beta]$. بالتدقيق في الشكلين 8.8 و 8.9 يمكن كتابة العلاقات بين هذه المجموعات من التيارات : مثلاً مساواة التيار $\mathbf{I}_1$ الجاري باتجاه العقدة 1 في شكل 8.8 للتيار $(\mathbf{I}_1'-\mathbf{i}_k')$ الجاري باتجاه العقدة 1 عند ربط الفرع المقطوع $\mathbf{y}_{kk}$ الى الشبكة α_1 لشكل 8.9 . وباستعمال حقيقة كون $\mathbf{i}_k'$ يجب ان يساوي $\mathbf{i}_6$ ، نحصل على أولى معادلات [8.92] ، التي هي النص الكـامل للمعادلـة [8.89] .



شكل 8.9 المنظومة البدائية

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{I}'_1 &= \mathbf{I}_1 + \mathbf{i}_6 \\ \mathbf{I}'_2 &= \mathbf{I}_2 + \mathbf{i}_5 \\ \mathbf{I}'_3 &= \mathbf{I}_3 - \mathbf{i}_5 \\ \mathbf{I}'_4 &= \mathbf{I}_4 - \mathbf{i}_6 \\ \mathbf{i}'_e &= \mathbf{i}_5 \\ \mathbf{i}'_k &= \mathbf{i}_6 \end{aligned}\right\} \qquad [8.92]$$

[8.89] و[8.92] يمكن ان تجزء بحيث ان التيارات على الاطراف اليسرى من المعادلات الأربع الاولى لـ[8.92] التي توصل الشبكتين α_1 و α_2 لشكل 8.9 . هي المتجه العمودي [$\mathbf{I}'_\alpha$] . وبالتشابه فان المعادلتين الاخيرتين هما التيارات $[\mathbf{I}'_\beta]$. واذا كانت

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = [\mathbf{I}_\alpha] \quad \text{and} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{i}_5 \\ \mathbf{i}_6 \end{bmatrix} = [\mathbf{I}_\beta]$$

فان [8.89] و[8.92] يمكن أن تكتبا كما يلي

$$\begin{bmatrix} I'_\alpha \\ -- \\ I'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U & C'' \\ --- & --- \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ -- \\ I_\beta \end{bmatrix} \qquad [8.93]$$

حيث ان U ترمز الى المصفوفة الاحادية (الملحق م 1.7) . فـي هذه الحالة ستكون المصفوفة الأحادية الأولى ذات رتبة 4 والثانية ذات رتبة 2 و

$$[C''] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

واذا كان المتجه العمودي للفولتيات العقدية وفولتيات الفروع المقطوعة فـي الشبكـة البدائية لشكل [8.9] هو [V'] فان

$$[I'] = [Y'][V'] \qquad [8.94]$$

ضرب مسبق لـكلا طرفي [*8.94*] بالمصفوفة $[Z'] = [Y']^{-1}$ سيعطينا

$$[V'] = [Z'][I'] \qquad [8.95]$$

وبما أن مصفوفة المسامحة [Y'] تتألف من مصفوفات المسامحة للأجزاء المنفصلة للشّبكة البدائية وبدون تقارن تبادلـي بينهما فان هذه المنظومات هـي العناصر القطرية للمصفوفة المركبة [Y'] مع كل الحدود غير القطرية مساوية لصفر .

$$[Y'] = \begin{bmatrix} Y'_\alpha & \vdots & 0 \\ - & - & - \\ 0 & \vdots & Y'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_{\alpha 1} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & Y'_{\alpha 2} & \vdots & 0 \\ - & - & - & - \\ 0 & 0 & \vdots & Y'_\beta \end{bmatrix} \qquad [8.96]$$

وبالتشابه فان المعكوس أو مصفوفـة الممانعة $[Z']$ تتألف من عناصر قطرية كل منها هو معكوس العنصر المناظر في $[Y']$ نظراً لأن كلاً منها ينتسب الى أحد الأجزاء المنفصلة من الشبكة فـي شكل 8.9 ، أي [$[Z'_{\alpha 1}] = [Y'_{\alpha 1}]^{-1}$] و $[Z'_{\alpha 2}] = [Y'_{\alpha 2}]^{-1}$ و

$$[Z'_\beta] = [Y'_\beta]^{-1}$$ حيث ان

$$[Z'] = \begin{bmatrix} Z'_\alpha & \vdots & 0 \\ --- & & -- \\ 0 & \vdots & Z'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{\alpha 1} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & Z'_{\alpha 2} & \vdots & 0 \\ --- & --- & & -- \\ 0 & 0 & \vdots & Z'_\beta \end{bmatrix} \qquad [8.97]$$

ان مصفوفة المسامحة المعكوسة $[Z] = [Y]^{-1}$ للمنظومة الـكاملة فـي شكـل 8.7 سوية مع حدود الفروع المقطوعة موصولةً بالمصفوفة $[Z']$ بشرط عدم تغير القدرة هذا الشرط ينشـيء علاقة بين مصفوفة المسامحة العقدية $[Y]$ لـكل المنظومة زائداً الفروع المقطوعة وتلك التـي للشبكة البدائية $[Y']$ والتـي نص عليها في [7.11] بدلالة مصفوفة الربط [C] . تعويـض نتائج [8.90] و [8.91] فـي [7.11] يعرف لنا العلاقة التالية بدلالة مصفوفة الربـط $[C']$ التي تم استعمالها هنا

$$[Y] = [C']^{-1}[Y'][C'^*]_t^{-1} \qquad [8.98]$$

وبذلك فان استعمال القاعدة المعطاة في الملحق م . 1.8.1 سيعطينا

$$[Z] = [Y]^{-1} = [C'^*]_t[Y']^{-1}[C']$$
$$[Z] = [C'^*]_t[Z'][C'] \qquad [8.99]$$

وبالتعويض عن $[C']$ من [8.89] و[8.93] وعن $[Z']$ من [8.97] في [8.99] وبحذف علامات المرافق للسهولة لأن $[C']$ ستحتوي اعتيادياً حدوداً حقيقية فقط .

$$[Z] = \begin{bmatrix} 1 & \vdots & 0 \\ -- & & -- \\ C''_t & \vdots & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Z'_\alpha & \vdots & 0 \\ -- & & -- \\ 0 & \vdots & Z'_\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & \vdots & C'' \\ -- & & -- \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z'_\alpha & \vdots & Z'_\alpha C'' \\ ---- & & ------ \\ C''_t Z'_\alpha & \vdots & (C''_t Z'_\alpha C'' + Z'_\beta) \end{bmatrix} \qquad [8.100]$$

مصفوفة الممانعة العقدية [Z] لـكل الشبكـة في شكـل 8.7 سويـة مع حـدود الفروع المقطوعة مجزأةً كما مبين فـي [8.100] يمكن أن تسمـى مصفوفاتها الثانوية على أنها [Z_1] و[Z_2] و[Z_3] و[Z_4] وبذلك

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ -- \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & \vdots & Z_2 \\ -- & - & -- \\ Z_3 & \vdots & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ -- \\ I_\beta \end{bmatrix} \qquad [8.101]$$

حيث ان [V_α] هـي متجه عمودي للفولتيات العقدية [V_1] و[V_2] و[V_3] و[V_4] لدائرة الشكل 8.7 ، و $[V_\beta] = 0$ لأنها متجه عمودي للفولتيات التـي على التوالـي مـع الفروع المقطوعة وهاتان كلتاهما صفر . وبفك [8.101] وحذف الأقواس المربعة حول المصفوفات بصورة مؤقتة للسهولة سنحصل على

$$V_\alpha = Z_1 I_\alpha + Z_2 I_\beta \qquad [8.102]$$

$$0 = Z_3 I_\alpha + Z_4 I_\beta \qquad [8.103]$$

ومن [8.103] يكون التيار

$$I_\beta = -Z_4^{-1} Z_3 I_\alpha$$

وبتعويض هذه القيمة للتيار في [8.102] سنحصل على

$$V_\alpha = (Z_1 - Z_2 Z_4^{-1} Z_3) I_\alpha \qquad [8.104]$$

وبمقارنة [8.100] و [8.101] وتعويض قيم Z_1 و Z_2 و...الخ من [8.104] نحصل على

$$V_\alpha = \{Z'_\alpha - Z'_\alpha C''(C''_t Z'_\alpha C'' + Z'_\beta)^{-1} C''_t Z'_\alpha\} I_\alpha \qquad [8.105]$$

وبما أن دائرة الشكل 8.7 لها التيارات والفولتيات العقدية [I_α] و[V_α] فان مصفوفة الممانعة العقدية التي نحتاجها هي تلك المصفوفة المعطاة بالمعادلة [8.105] .

سننتقل الآن مباشرة الى مثال محلول بطريقةعكس المصفوفة وباستعمال طريقتين تقللان من رتبة المصفوفات التـي ستعكس هما (أ) التقطيع (ب) التجزئة . الرجوع الى حلول هذا المثال ستوضح لنا بعض الأختلافات بين هاتين الطريقتين رغم أن الصعوبة المعتادة التـي ستنشأ هنا هـي أن طرق التحليلات لايمكن تبيانها بدقة بالأمثلـة التي تكون غير حقيقية نسبياً والتـي يمكن أن تحل بسهولة بوسائل أبسط . والتجزئة رغـم أنها تقلل وقت الحاسبة الا أنها تحتاج الى مصفوفة المسامحة العقدية كاملة وهذه المصفوفة لها أصفار قليلة نسبياً ولاتقلل الطلب على خزن الحاسبة بينما المصفوفات المركبة للمسامحة و الممانعة العقدية المستعملة في طريقـة التقطيع تحتوي أصفاراً عديدة بحيث أنهـا ستقلل خزن الحاسبة وكذلك الوقت المستغرق في طريقة التجزئة ، يحدث ضرب مصفوفات عدة مرات بينما في طريقة التقطيع تكون عمليات الضرب بوساطـة $[C'']$ أو $[C'']_t$ جمعاً فقط لأن عناصرها هي ± 1 . والعكس المتضمن في الطريقتين يكون متشابهاً فمثلا في المثال التالـي تحدث أربع عمليات عكس لمصفوفات 2×2 في كـل طريقة .

مثـال محلـول 8.5 :

في منظومة الشكل 8.7 تكون التيارات العقدية بنسبة الوحدة هـي $\mathbf{I}_1 = 2\cdot0$ و $\mathbf{I}_2 = 0$ و $\mathbf{I}_3 = 0$ و $\mathbf{I}_4 = 3\cdot0$. والمسامحات بنسبة الوحدة (على أساس مشترك هي $\mathbf{y}_{aa} = 0\cdot5$ و $\mathbf{y}_{bb} = 1\cdot5$ و $\mathbf{y}_{cc} = 2\cdot5$ و $\mathbf{y}_{dd} = 0\cdot5$ و $\mathbf{y}_{ee} = 5\cdot0$ و $\mathbf{y}_{ff} = 0\cdot25$ و $\mathbf{y}_{gg} = 4\cdot0$ و $\mathbf{y}_{hh} = 0\cdot75$ و $\mathbf{y}_{jj} = 0\cdot25$ و $\mathbf{y}_{kk} = 4\cdot0$. (المدور ر—تم حذفه للسهولة) . احسب الفولتيات عند العقد 4, 3, 2, 1 (أ) بطريقة التقطيع (ب) بطريقة التجزئة .

الحل

(أ) بطريقة التقطيع

مصفوفة التيار العقدي للمنظومة في شكل 8.7 سيشار لها بـ $[\ \mathbf{I}_\alpha\ ]$ (أنظر[8.93]) وهذه المصفوفة سيتم تجزئتهـا لتتوافق مع تقطيع الشبكة الى شبكتين مركبتين α_1 و α_2 كما في شكل 8.9 . وهكذا فان

$$[\mathbf{I}_\alpha] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha 1} \\ -- \\ \mathbf{I}_{\alpha 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ - \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

ومصفوفة الترابط $[C'']$ (أنظر [8.93]) ستكون

$$[\mathbf{C}''] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -- & -- \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

وهكذا فان

$$[\mathbf{C}'']_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \vdots & -1 & 0 \\ 1 & 0 & \vdots & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

المصفوفة المركبة [Y'_α] للشبكات المنفصلة لشكل 8.9 التـي تم تقطيع الشبكة الأصلية اليها ستكون

$$[\mathbf{Y}'_\alpha] = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_{\alpha 1} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}'_{\alpha 2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 4\cdot5 & -2\cdot5 & 0 & 0 \\ -2\cdot5 & 3 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 4\cdot25 & -4 \\ 0 & 0 & -4 & 5 \end{array}\right]$$

ومصفوفة المسامحة للفروع المقطوعة هي

$$[\mathbf{Y}'_\beta] = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}$$

ومصفوفات المسامحة المعكوسة للشبكات المركبة المنفصلة والفروع المقطوعة [$Z'_{\alpha1}$] و [$Z'_{\alpha2}$] و [Z'_{β}] تكون كما يلي

$$[Z'_{\alpha1}] = [Y'_{\alpha1}]^{-1} = \frac{1}{7{\cdot}25}\begin{bmatrix} 3 & 2{\cdot}5 \\ 2{\cdot}5 & 4{\cdot}5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{\cdot}415 & 0{\cdot}345 \\ 0{\cdot}345 & 0{\cdot}621 \end{bmatrix}$$

$$[Z'_{\alpha2}] = [Y'_{\alpha2}]^{-1} = \frac{1}{5{\cdot}25}\begin{bmatrix} 5 & 4 \\ 4 & 4{\cdot}25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{\cdot}952 & 0{\cdot}762 \\ 0{\cdot}762 & 0{\cdot}809 \end{bmatrix}$$

$$[Z'_{\beta}] = [Y'_{\beta}]^{-1} = \frac{1}{20}\begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{\cdot}2 & 0 \\ 0 & 0{\cdot}25 \end{bmatrix}$$

$$[Z'_{\alpha}] = \begin{bmatrix} Z'_{\alpha1} & 0 \\ 0 & Z'_{\alpha2} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 0{\cdot}415 & 0{\cdot}345 & 0 & 0 \\ 0{\cdot}345 & 0{\cdot}621 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0{\cdot}952 & 0{\cdot}762 \\ 0 & 0 & 0{\cdot}762 & 0{\cdot}809 \end{array}\right]$$

$$[Z'_{\alpha}][C''] = \begin{bmatrix} 0{\cdot}345 & 0{\cdot}415 \\ 0{\cdot}621 & 0{\cdot}345 \\ -0{\cdot}952 & -0{\cdot}762 \\ -0{\cdot}762 & -0{\cdot}809 \end{bmatrix}$$

$$[C'']_t[Z'_{\alpha}][C''] = \begin{bmatrix} 1{\cdot}573 & 1{\cdot}107 \\ 1{\cdot}107 & 1{\cdot}224 \end{bmatrix}$$

$$[C'']_t[Z'_{\alpha}][C''] + [Z'_{\beta}] = \begin{bmatrix} 1{\cdot}773 & 1{\cdot}107 \\ 1{\cdot}107 & 1{\cdot}474 \end{bmatrix}$$

$$([C'']_t[Z'_{\alpha}][C''] + [Z'_{\beta}])^{-1} = \frac{1}{1{\cdot}38}\begin{bmatrix} 1{\cdot}474 & -1{\cdot}107 \\ -1{\cdot}107 & 1{\cdot}773 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1{\cdot}07 & -0{\cdot}803 \\ -0{\cdot}803 & 1{\cdot}29 \end{bmatrix}$$

$$[Z'_\alpha][C''](\,[C'']_t[Z'_\alpha][C'']+[Z'_\beta])^{-1}=\begin{bmatrix} 0\cdot036 & 0\cdot258 \\ 0\cdot387 & -0\cdot055 \\ -0\cdot41 & -0\cdot219 \\ -0\cdot167 & -0\cdot427 \end{bmatrix}$$

$$[C'']_t[Z'_\alpha]=\begin{bmatrix} 0\cdot345 & 0\cdot621 & -0\cdot952 & -0\cdot762 \\ 0\cdot415 & 0\cdot345 & -0\cdot762 & -0\cdot809 \end{bmatrix}$$

$$[Z'_\alpha][C''](\,[C'']_t[Z'_\alpha][C'']+[Z'_\beta])^{-1}[C'']_t[Z'_\alpha]$$

$$=\begin{bmatrix} 0\cdot119 & 0\cdot11 & -0\cdot231 & -0\cdot235 \\ 0\cdot111 & 0\cdot221 & -0\cdot326 & -0\cdot250 \\ -0\cdot232 & -0\cdot329 & 0\cdot557 & 0\cdot489 \\ -0\cdot235 & -0\cdot251 & 0\cdot485 & 0\cdot472 \end{bmatrix}$$

وبطرح مصفوفة الممانعة هذه من [Z'_α] (أنظر[*8.105*])ستعطينا مصفوفة الممانعة العقدية للشبكة في شكل8.7 والتـي تصل الفولتيات العقدية التـي نحتاجهـا الى التيارات العقدية المعطاة وكما يلي

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\cdot296 & 0\cdot235 & 0\cdot231 & 0\cdot235 \\ 0\cdot234 & 0\cdot400 & 0\cdot326 & 0\cdot250 \\ 0\cdot232 & 0\cdot329 & 0\cdot395 & 0\cdot273 \\ 0\cdot235 & 0\cdot251 & 0\cdot277 & 0\cdot337 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

منها ستكون الفولتيات العقدية

$V_1 = 1\cdot297$ p.u., $V_2 = 1\cdot218$ p.u., $V_3 = 1\cdot283$ p.u., and
$V_4 = 1\cdot481$ p.u.

الحل

(ب) بطريقة التجزئة .

من المناسب تجزئة الشبكة ذات العقد الأربع في شكل 8.7 بطريقة بحيث أن المصفوفات

الثانوية لمصفوفة المسامحة ذات أربعة × أربعة تكون ذات اثنين × اثنين وهكذا فيمكننا كتابة [8.40] بعد تفحصها كما يلي

$$[I] = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 3 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 8{\cdot}5 & -2{\cdot}5 & 0 & -4 \\ -2{\cdot}5 & 8 & -5 & 0 \\ \hline 0 & -5 & 9{\cdot}25 & -4 \\ -4 & 0 & -4 & 9 \end{array}\right] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \hline V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

والحل يمكن أن يكتب بالنمط المجزأ كما يلي

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \hline V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} Z_1 & Z_2 \\ \hline Z_3 & Z_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

حيث أن Z_1 و Z_2 و Z_3 و Z_4 تعرف بدلالة المصفوفات الثانوية الأربع في مصفوفة المسامحة العقدية بالمعادلة [8.51] .

$$[Z_1] = ([Y_1]-[Y_2][Y_4]^{-1}[Y_3])^{-1}$$

$$[Y_4]^{-1} = \frac{1}{67{\cdot}25}\begin{bmatrix} 9 & 4 \\ 4 & 9{\cdot}25 \end{bmatrix}$$

$$[Y_2][Y_4]^{-1} = \frac{1}{67{\cdot}25}\begin{bmatrix} 0 & -4 \\ -5 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 9 & 4 \\ 4 & 9{\cdot}25 \end{bmatrix} = \frac{1}{67{\cdot}25}\begin{bmatrix} -16 & -37 \\ -45 & -20 \end{bmatrix}$$

$$[Y_2][Y_4]^{-1}[Y_3] = \frac{1}{67{\cdot}25}\begin{bmatrix} -16 & -37 \\ -45 & -20 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & -5 \\ -4 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2{\cdot}2 & 1{\cdot}19 \\ 1{\cdot}19 & 3{\cdot}35 \end{bmatrix}$$

$$[Y_1]-[Y_2][Y_4]^{-1}[Y_3] = \begin{bmatrix} 6{\cdot}3 & -3{\cdot}69 \\ -3{\cdot}69 & 4{\cdot}65 \end{bmatrix}$$

$$[Z_1] = \frac{1}{15{\cdot}7}\begin{bmatrix} 4{\cdot}65 & 3{\cdot}69 \\ 3{\cdot}69 & 6{\cdot}3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{\cdot}296 & 0{\cdot}235 \\ 0{\cdot}235 & 0{\cdot}401 \end{bmatrix}$$

$$[Z_2] = -[Z_1][Y_2][Y_4]^{-1} = \frac{1}{67\cdot25}\begin{bmatrix}0\cdot296 & 0\cdot235\\0\cdot235 & 0\cdot401\end{bmatrix}\begin{bmatrix}16 & 37\\45 & 20\end{bmatrix}$$

$$[Z_2] = \begin{bmatrix}0\cdot228 & 0\cdot233\\0\cdot324 & 0\cdot248\end{bmatrix}$$

$$[Z_4] = ([Y_4]-[Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2])^{-1}$$ سنحسب قبل [Z_3] للسهولة مبتدئين

بعكس المصفوفة [Y_1]

$$[Y_1]^{-1} = \frac{1}{61\cdot75}\begin{bmatrix}8 & 2\cdot5\\2\cdot5 & 8\cdot5\end{bmatrix}$$

$$[Y_1]^{-1}[Y_2] = \frac{1}{61\cdot75}\begin{bmatrix}-12\cdot5 & -32\\-42\cdot5 & -10\end{bmatrix}$$

$$[Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2] = \frac{1}{61\cdot75}\begin{bmatrix}212\cdot5 & 50\\50 & 128\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}3\cdot44 & 0\cdot81\\0\cdot81 & 2\cdot07\end{bmatrix}$$

$$[Y_4]-[Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2] = \begin{bmatrix}5\cdot81 & -4\cdot81\\-4\cdot81 & 6\cdot93\end{bmatrix}$$

$$([Y_4]-[Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2])^{-1} = \frac{1}{17\cdot2}\begin{bmatrix}6\cdot93 & 4\cdot81\\4\cdot81 & 5\cdot81\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\cdot403 & 0\cdot279\\0\cdot279 & 0\cdot338\end{bmatrix}$$
$$= Z_4$$

$$[Z_3] = ([Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2]-[Y_4])^{-1}[Y_3][Y_1]^{-1}$$

$$[Y_3][Y_1]^{-1} = \frac{1}{61\cdot75}\begin{bmatrix}-12\cdot5 & -42\cdot5\\-32 & -10\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-0\cdot203 & -0\cdot689\\-0\cdot518 & -0\cdot163\end{bmatrix}$$

$$([Y_3][Y_1]^{-1}[Y_2]-[Y_4])^{-1} = \begin{bmatrix}-0\cdot403 & -0\cdot279\\-0\cdot279 & -0\cdot338\end{bmatrix}$$

وبالتفحص في سالبها المحسوب عند ايجاد [Z_4]

وهكذا فان $$[Z_3] = \begin{bmatrix}0\cdot228 & 0\cdot325\\0\cdot233 & 0\cdot248\end{bmatrix}$$

وبتجميع مصفوفة الممانعة العقدية الـكاملة سنحصل على

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{\cdot}296 & 0{\cdot}235 & 0{\cdot}228 & 0{\cdot}233 \\ 0{\cdot}235 & 0{\cdot}401 & 0{\cdot}324 & 0{\cdot}248 \\ 0{\cdot}228 & 0{\cdot}325 & 0{\cdot}403 & 0{\cdot}279 \\ 0{\cdot}233 & 0{\cdot}251 & 0{\cdot}279 & 0{\cdot}338 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \end{bmatrix}$$

المقارنة مع نتائج طريقة التقطيع تبين أن هناك أختلافات مقدارها $\%1\pm$ تقريبا بسبب استعمال المسطرة المنزلقة . تركت هذه الأختلافات هنا بصورة متعمدة لغرض الانتباه اليها ، رغم أن الطلبة لايمكنهم دائما أستعمال ماكنة حساب يدوية أو أستيعمال البرمجة على الحاسبة خلال مدة دراستهم .

المراجع

BRAMELLER, A. 1965. Tensors, diakoptics and power system load flow calculations. *Conference on the Application of Digital Methods to Electrical Power Systems.* University of Newcastle-upon-Tyne.

BRAMELLER, A., JOHN, M. N. & SCOTT, M. R. 1969. *Practical Diakoptics For Electrical Networks.* Chapman and Hall, London.

DAY, J. E. & PARTON, K. C. 1965. Generalised computer program for power-system analysis. *Proc. I.E.E.*, **112**, No. 12, 2261–2274.

LAUGHTON, M. A. & DAVIES, M. W. H. 1964. Numerical techniques in solution of power system load flow problems. *Proc. I.E.E.*, **111**, No. 9, 1575–1588.

MORTLOCK, J. R. & DAVIES, M. W. H. 1952. *Power System Analysis.* Chapman and Hall, London.

PARTON, K. C., ALLEN, J. W. & TEOH, C. K. 1963. Power-system analysis using the digital computer. *G.E.C. Journal*, **30**, No. 3, 3–13.

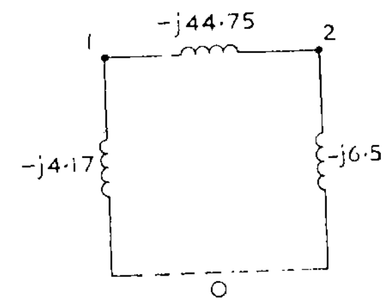
STAGG, G. W. & EL-ABIAD, A. H. 1968. *Computer Methods in Power System Analysis.* McGraw-Hill, New York.

STEVENSON, W. D. 1962. *Elements of Power System Analysis.* McGraw-Hill, New York.

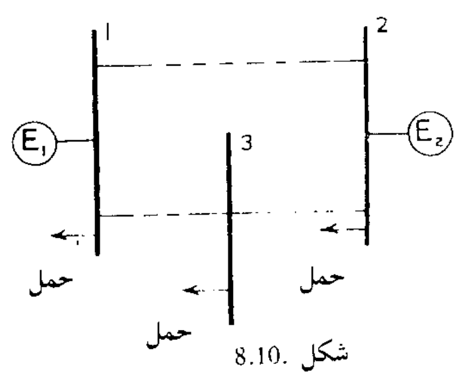
مسائـــل

1. بين كيف يمكن عكس مصفوفة المسامحة العقدية بطريقة التجزئة لـكي تعطينا مصفوفة معكوسة محللة الى العوامل . استعمل هذه الطريقة لحساب الفولتية العقدية عند العقدة 1 في منظومة القدرة الثلاثية الطور المتوازنة ذات محطات التوليد الثلاثة التالية . أهمل كافة المقاومات وعد كل المفاعلات معطاة بنسبة الوحدة وعلى الـ MVA الأساس نفسها . عند العقدة 1 توجد وحدة محول ومولد G_1T_1 لها ق . د . ك . طورية $1{\cdot}1\underline{/0°}$ بنسبة الوحدة ومفاعلة 0·55 بنسبة الوحدة وهناك حمل طور الى محايد محلي ذو ممانعة 2·0 بنسبة الوحدة . عند العقدة 2 ,G_2T_2 لها ق . د . ك . $1{\cdot}16\underline{/0°}$ بنسبة الوحدة ومفاعله 0·4 بنسبة الوحدة وهناك حمل ذو مفاعلة 2·5 بنسبة الوحدة . عند العقدة 3 ,G_3T_3 لها ق . د . ك . $1{\cdot}14\underline{/0°}$ بنسبة الوحدة ومفاعلة 0·6 بنسبة الوحدة وهناك حمل ذو مفاعلة 3·0 بنسبة الوحدة . مفاعلات خطوط النقل الرابطة لمحطات التوليد هي 0·02 بنسبة الوحدة بين 1 و 2 و 0·04 بنسبة الوحدة بين 2 و 3 و 0·025 بنسبة الوحدة بين 1 و 3 .
(جامعة ليدز) (0·934 p.u.)

2. القوى الدافعة الـكهربائية في المنظومة المبينة في شكل 8.10 هي $E_1 = 1{\cdot}2\underline{/0°}$ بنسبة الوحدة و $E_2 = 1{\cdot}4\underline{/0°}$ بنسبة الوحدة والمفاعلات بنسبة الوحدة هي : الخط بين 1 و 2 = 0·05 والخط بين 1 و 3 = 0·02 والخط بين 3 و 2 = 0·02 والحمل طور الى محايد عند 1 = 3·0 والحمل طور الى محايد عند 2 = 1·0 والحمل طور الى محايد عند 3 = 1·0 . والمولد 1 = 0·3 والمولد 2 = 0·2. اهمل كافة المقاومات .



شكل 8.11.



شكل 8.10.

ارسم الدائرة باستعمال المسامحات بنسبة الوحدة ومولدات التيار واكتب مصفوفة المسامحة العقدية . احذف العقدة 3 بطريقة تجزئة المصفوفة وحقق الطريقة . ارسم الدائرة المصغرة مع قيم المسامحات بنسبة الوحدة موضحة عليها . أوجد الفولتيات عند قضبان التوزيع لمحطتي التوليد .

(جامعة ليدز)

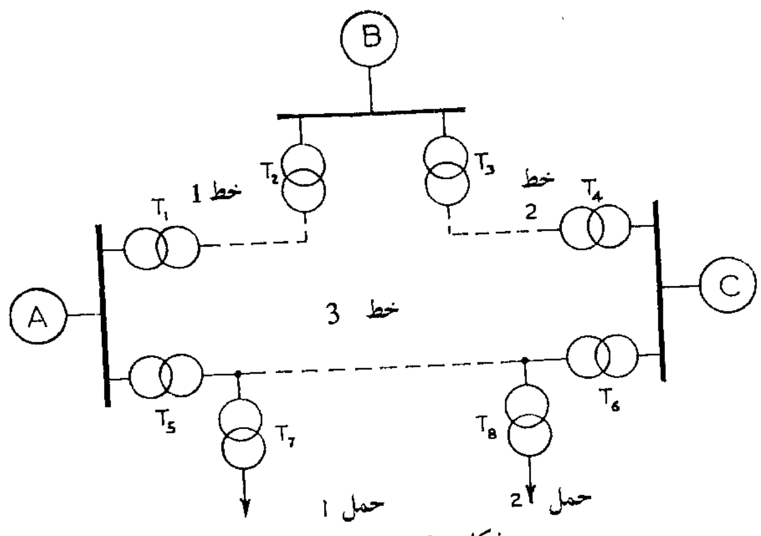
(شكل 8.11 يبين الحل مع المسامحات بنسبة الوحدة ,1·036 p.u. 1·027 p.u.)

3 . في منظومة قدرة ثلاثية الطور ، المولد 1 له ق . د . ك . $1{\cdot}2\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة ومفاعلة 0·1 بنسبة الوحدة وحمل طور الى محايد محلي ذو مفاعلة 1·0 بنسبة الوحدة تم ربطه بوساطة خط نقل ذي مفاعلة 0·04 بنسبة الوحدة الى قضيب التوزيع 3 حيث يوجد هناك حمل ذو مفاعلة 2·5 بنسبة الوحدة . مولد ثان 2 له ق . د . ك . $1{\cdot}1\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة ومفاعلة 0·2 بنسبة الوحدة وحمل محلي ذو مفاعلة 4·0 بنسبة الوحدة تم ربطه الى قضيب التوزيع 3 بوساطة خط ذي مفاعلة 0·05 بنسبة الوحدة . يمكن اهمال كافة المقاومات ، الممانعات كلها معطاة الى الـ MVA الأساس المشترك .

أكتب مصفوفة المسامحة العقدية ثم حدد الفولتيات العقدية بوساطة عكس المصفوفة . اذا تم ربط حمل جديد ذي مفاعلة 1·0 بنسبة الوحدة على التوازي مع الحمل الموجود عند قضيب التوزيع للمولد 2. فأوجد المصفوفة المعكوسة الجديدة من [8.54] .

$$\left(\frac{j}{11130}\begin{bmatrix} 726 & 458 & 601 \\ 458 & 926 & 660 \\ 601 & 660 & 866 \end{bmatrix} 1{\cdot}05\ \text{p.u.},\ 1{\cdot}04\ \text{p.u.},\ 1{\cdot}037\ \text{p.u.} \right)$$ (جامعة ليدز)

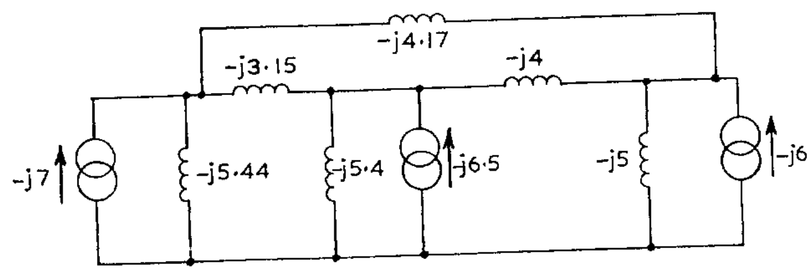
4 استعمل طريقة تجزئة المصفوفة لحذف أكبر عدد ممكن من العقد في الشبكة المبينة في شكل 8.12 . وارسم مخططاً يبين المسامحات التي بقيت بعد تصغير الشبكة بهذه الطريقة تبيـن بصورة مختصرة كيفية تحديد الجهود نسبةً الى الأرض للعقد المتبقية . يمكن اهمال مقاومة الفروع كلها في الدائرة في شكل 8.12 . المفاعلات بنسبة الوحدة لكل طور هي : المولدات A و B و C كل منها 0·20 . المحولتان T_1 و T_8 كل منهما 0·10 . خط 1 = 0·04 وخط 2 = 0·05 وخط 3 = 0·10 . الحمل 1 (طور الى محايد) = 1·90 والحمل 2 (طور الى محايد) = 2·40. . القوى الدافعة الكهربائية للأطوار المناظرة للمولدات C و B و A, على التوالي هي $1{\cdot}4\underline{/0^\circ}$ و $1{\cdot}2\underline{/0^\circ}$ و $1{\cdot}3\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة .



شكل 8.12

(جامعة ليدز)

(شكل 8.13 يبين الحل مع التيارات والمسامحات بنسبة الوحدة)



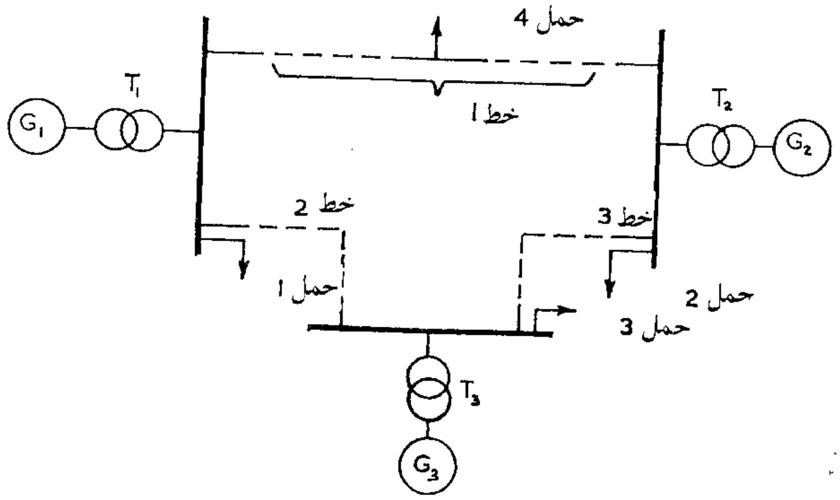
شكل 8.13

5 . المفاعلات بنسبة الوحدة لمعدات منظومة القدرة المبينة في شكل 8.14 (كلها الى الـ MVA الأساس نفسه) هي : المولد / المحول $G_1T_1 = 1{\cdot}0$ و $G_2T_2 = 1{\cdot}25$ و $G_3T_3 = 2{\cdot}0$ ، الحمل 1 = 2·0 و الحمل 2 = 1·0 والحمل 3 = 1·25 والحمل 4 = 2·5، الخط 1 = 0·05 والخط 2 = 0·02 و الخط 3 = 0·025. القوى الدافعة الـكهربائية الطورية للمولدات هي $E_1 = 2{\cdot}2\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة و $E_2 = 2{\cdot}5\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة و $E_3 = 2{\cdot}0\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة . الحمل 4 يقع منتصف طريق الخط

1 .كون مصفوفة المسامحة العقدية لهذه المنظومة وباستعمال جبر المصفوفات احذف عقدة واحدة لـكي نحصل على مصفوفة المسامحة العقدية المقلصة . بين كيف يمكننا عكس مصفوفة المسامحة العقدية بطريقة التجزئة وطبق النتائج المشتقـــة على مصفوفة المسامحة المقلصة التي حصلنا عليها لمنظومة الشكل 8.14 واحسب الفولتية عند قضبان التوزيع التي تم ربط الحمل 2 اليها .
(جامعة ليدز)

$$\left(-j\begin{bmatrix} 2{\cdot}2 \\ 2{\cdot}0 \\ 1{\cdot}0 \end{bmatrix} = -j\begin{bmatrix} 71{\cdot}6 & -19{\cdot}9 & -50 \\ -19{\cdot}9 & 61{\cdot}9 & -40 \\ -50 & -40 & 91{\cdot}3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_3 \end{bmatrix}; \right)$$

$$V_2 = 1{\cdot}034 \text{ p.u.}$$



شكل 8.14.

6 .اكتب معادلات الفولتية العقدية $\mathbf{I} = \mathbf{YV}$ لثلاث عقد من البيانات المعطاة فيما يلي حدد قيم كل من الـكميات المركبة التالية بقيم نسبة الوحدة على الاساس 100 ميكافولت امبير : $\mathbf{I}_3$ و$\mathbf{Y}_{13}$ و$\mathbf{Y}_{11}$. ثلاث محطات قدرة متشابهة تماما1و 2و 3 كل منها تحتوي على اربع مجموعات مولد–محول متشابهة تماماً .كل مولد له مفاعلة متزامنة 1·9 بنسبة الوحدة . وكل محول له مفاعلة تسربية 0·1 بنسبة الوحدة كل المكائن تعمل تحت ظروف الحالة المستقرة . القوى الدافعة الـكهربائيـــة للمصادر مفتوحة الدائرة عند المحطات هي على التوالي $2{\cdot}1\underline{/20°}$ و $2{\cdot}05\underline{/10°}$ و

$2\cdot0\underline{/0^\circ}$ بنسبة الوحدة . المحطات مترابطة فيما بينها بحلقة مغلقة من خطوط 275 كيلوفولت ذات الاطوال : 1 الى 2 بطول 160 كم ، 2 الى 3 بطول 160 كم ، و 1 الى 3 بطول 320 كم . مفاعلة الخط هي 0·47 اوم / كم والمقاومة ذات قيمة مهملة . الحمل الوحيد تم ربطه الى المحطة 3 . جميع البيانات بنسبة الوحدة مأخوذة على الاساس 100 ميكافولت امبير .

(−j17·0 ، j5 0·0−j4·0 p ·u) (L.C.T.)

7 . منظومة نقل تم تمثيلها بدائرة T متماثلة لها مفاعلة متوالية كلية j1·2 بنسبة الوحدة ومفاعله على التوازي كلية j2 بنسبة الوحدة . المنوب المجهز تم تمثيله بدائرة متواليه مكافئة لها ق . د . ك . (1·1+j0·1) بنسبة الوحدة ومفاعلة j0·4 بنسبة الوحدة . البيانات المناظرة للحمل (محرك متزامن) هي ق . د . ك خلفية(0·9 −j0·2) بنسبة الوحدة ومفاعله 1·4 بنسبة الوحدة . البيانات تشير الى القيم خط الى محايد المكافئة وكل القيم بنسبة الوحدة محسوبة على الاساس نفسه . استعمل طريقـة التيارات الشبكية وعكس المصفوفة واحسب التيارات الداخلة والخارجة مـن المنظومة ثم الفولت امبير من المنوب الى الحمل بشكل $(P+jQ)$ حيث يعد الـ vars المتأخر موجبا .

0·1 +j0·0625 p.u., 0·1 −j0·325 p.u.) (L.C.T.)
(0·0775 −j0·0762 p.u./phase, 0·0775+j0·368 p.u /phase

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الفصل التاسع

اوجه تكامل المنظومات وتطورها

ASPECTS OF SYSTEM INTEGRATION AND DEVELOPMENT

9.1 المقدمة

ان تصميم وتشغيل جزء معين من معدات منظومة قدرة لا يمكن التعامل معه بدراسة خواص كل جهاز بصورة منفصلة ، ذلك لأن المعدات تعمل جزءاً من منظومة متكاملة . حيث يجب ان تتفاعل كل مركبة بصورة مرضية مع بقية المعدات تحت ظروف الحالتين المستقرة ، والعابرة ، وتؤثر التحسينات في منطقة معينة باستمرار في الأجهزة الأخرى . مع ذلك ، وقبل ان يكون تقدير المشاكل التي تدخل في عملية التفاعل بين مركبات المنظومة ممكناً ، يكون من الضروري اعطاء مقدمة عن خصائصها كل على حدة ، وهذه المقدمة احتواها الجزء الأول من هذا الكتاب . حتى أنه في هذه المقدمة جرت مناقشة محاولات لتحديد بعض الأوجه لأشتغال المنظومة ، ومثال على ذلك عندما تم التطرق للمولدات التزامنية وتأثير التحسينات في منظمات الفولتية على استقرارية الماكنة عند اشتغالها بعامل قدرة متقدم .

يناقش هذا الجزء من الكتاب المباديء الأساسية في التصميم والتشغيل لمنظومة القدرة كلاً او جهاز معين بعلاقته مع بقية اجزاء المنظومة . ويروم موضوع هذا الفصل تأكيد اسلوب معاملة المنظومات هذا في ضوء التطورات الحاضرة في منظومة التجهيز وانظمة التغذية ويعطي المراجع الحديثة لبعض من أهم المجالات المهمة للتطويرات الجارية .

لاتزال منظومات التوليد والنقل وماتشمله من مشاريع ومعدات ، والأساليب الفنية لتشغيلها وصيانتها خاضعة للتطوير المستمر . وبالتطبيقات الحكيمة لهذه التطويرات يمكن

لمسؤولي تجهيز الطاقة تحسين نوعية التجهيز المعطى للمستهلك . ويكون التحسين أما بتقليل كلفة الأستهلاك أو استمرارية التجهيز أوكليهما . واليوم يعاني المستهلك في انكلترا وويلز من انقطاع الطاقة بما معدله 90 دقيقة في السنة . مع ان بعض التحسينات في استمرارية التجهيز من خلال الأستعمال الكبير لقواطع الدورة الذاتية المعيدة للغلق وكذلك استخدام الحاسبات في مراكز السيطرة الرئيسية والمحطات الكبيرة . فقد ادى التطور في تصاميم المشاريع الى اظهار المستوى الحالي لتحقيق استمرارية التجهيز باقتصاد عال . وليس من الضروري فقط ان نتابع تطور التصاميم المحسّنة للمشروع والتي تقدم اداءات يمكن مقارنتها بالتصاميم السارية بتكاليف رأس مال واطيء . ولكن من الضروري ايضاً الأخذ بنظر الأعتبار التطورات الجديدة التي تقدم وبتكاليف اضافية قليلة اداءات قد تسمح بدورها في عمل اقتصاد كبير في تكاليف رأس المال على مشاريع اخرى . لذا فان التقنية المتقدمة يمكن ان تستغل لتحقق أعظم كسب في مجمل النواحي الأقتصادية وأفضل أمثلة للتفاعل بين تصميم اجزاء مختلفة من الوحدات والمعدات تقع في مضمار الأستقرارية العابرة للمنظومة التي تكون معتمدة على عدد كبير من العوامل .

9.2 الأستقرارية العابرة Transient stability

وكما نوقش في الفصل 3 . فأن العوامل التي تتدخل في الاستقرارية العابرة تتضمن زوايا الاحمال للمكائن في اللحظة التي تسبق حالة الاضطراب . وكذلك فترة بقاء الاضطراب والقدرة التزامنية التي يمكن ان تتدفق بين المكائن بعد الاضطراب . كذلك السيطرة المبذولة على تدفق البخار واثارة المكائن خلال الأضطراب وبعده .

كما تمت الاشارة اليه في الفقرة 7.8 و 7.9 من الجزء الاول . فان ادخاراً معقولاً في الـ ق . د . مغ . لدوار المولد ، ثم حجم ووزن الماكنة وكذلك تكاليفها يمكن ان يتم بتقليل الفجوة الهوائية ، وبذلك تقل نسبة القصر في الدائرة لها (الفقرة 7.3 من الجزء الاول) لكن هذا يزيد في زاوية الحمل ويقلل من استقرارية الماكنة . وفي الاوقات عندما يكون فيها الطلب الفعلي على المنظومة واطئاً . قد يتوجب امتصاص القدرة المتفاعلة ، اما بتأمين ملف مفاعل تواز او بتشغيل المولدات بعوامل قدرة متقدمة .كما اشير اليها في الفقرة 9.3 . ان دراسات الاستقرارية سوف تعزز فيما اذا كان هناك ضرورة للانفاق على

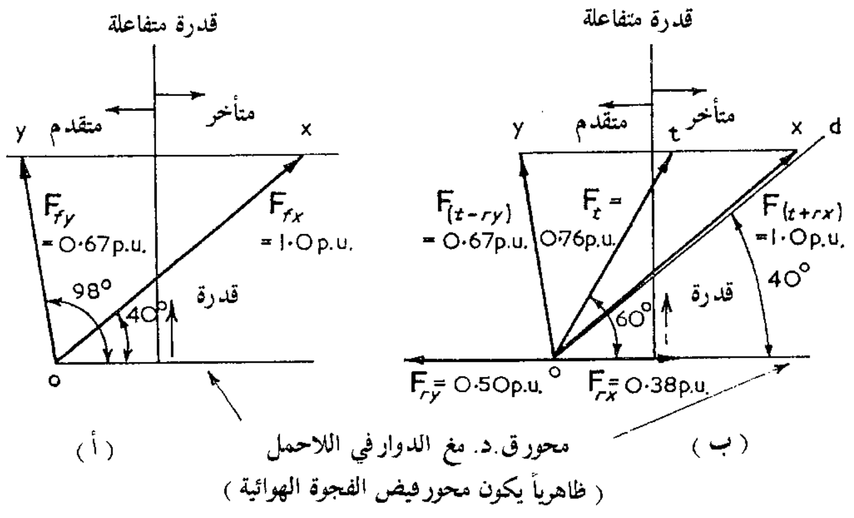
ملفات تواز مفاعلة بحيث سيعتمد هذا ، الى حد ما ، على القيمة المعتمدة لنسبة القصر في الدائرة للماكنة .

ان فترة تأثير الاضطراب لعطل منظومة هوزمن ازالة العطل الذي يشمل مجموع ازمان تشغيل قواطع الدورة واجهزة الحماية . وفي بريطانيا تم تقليل ازمان الاشتغال هذه الى 0.08 و 0.06 ثانية . عند تيارات عطل عالية لكن التصاميم الجارية سوف تمكن من تقليل ازمان الاشتغال كلها الى 0.04 ثانية ومع ان هذه الازمان المقللة سوف تزيد كلفة قواطع الدورة والحماية الا أنها سوف تؤدي الى توفير أكبر في تكاليف صناعة المولدات أو ملفات التوازي المفاعلة . ان تطور القاصمات الفراغية التي يحدث فيها افتراق صغير بين ملامساتها وفترة زمن قوس قصيرة يجعل امكانية تقليل زمن اشتغال قواطع الدورة الى 0.02 ثا اوحتى اقل من ذلك . ان مثل هذه الازمان القصيرة لتشغيل قواطع الدورة مع مقارناتها بازمان الحماية ليست من شأنها ان توفر اموالا كثيرة في مشاريع اخرى فقط ، ولكنها ايضاً تقلل وبصورة كبيرة اضرار العطل وتحد من تأثير الاضطرابات على المستهلك الى ادنى نسبة .

وتعتمد القدرة التزامنية التي تتدفق بين المكائن بعد حدوث اضطراب معين على عامل القسر لمنظومة الاثارة وكذلك على السيطرة المتطورة جدا التي يمكن بذلها على تيار الاثارة وعلى تدفق البخار خلال الاضطراب وبعده . الى الحال الحاضر تتم السيطرة على تدفق البخار بالاستناد فقط الى فولتية الساكن وسرعة الماكنة على التعاقب . حيث تعمل كل من منظمات الفولتية والمتحكمات بصورة مستقلة بعضها عن بعض ، ان ادخال منظومات سيطرة اثارة اسرع باستخدام ثايرسترات وكذلك ادخال المتحكمات الالكترونية والصمامات المعترضة للبخار بين الافران المعدة للتسخين وتوربينات الضغط البينية قد فتحت الطريق لتحقيق سيطرة اسرع على الاثارة والبخار الداخل الى المحرك التوربيني والى الاقتران الالكتروني بين منظمات الاثارة والمتحكمات والى تطبيقات مناسبة للمشتقتين الاولى والثانية لزاوية الدوار والفولتية والسرعة ، وربما للخرج بالميكاواط وكذلك ضغط بخار المحرك التوربيني ذي الضغط الواطيء لغرض التأكد من ان كلاً من الاثارة والسيطرة على البخار تعملان في جميع الاوقات لتوفيراقصى تأثير استقراري ممكن للماكنة . لذا ، يمكن ملاحظة ان في النهاية يكون هناك مسيطر الكتروني واحد للماكنة يجهز

بمعلومات تامة حول الظروف اللحظية المؤثرة على الماكنة وكذلك معدل تغير هذه الظروف؛ ودوائر التغذية الخلفية اللازمة لعملية الاستقرار .

لقد اقترحت طريقة للسيطرة على الاثارة تدعى سيطرة بانك – بانك وذلك لتخفيف التأثيرات الناتجة عن الانزلاق القطبي لمولد اثناء اضطراب شامل للمنظومة أو بعده . وفي حالة السيطرة الطبيعة للاثارة اما ان يتم ايقاف التأرجح في دوار الماكنة وعكسه باثارة قسرية أو تعجيله بحيث يؤدي الى انزلاق قطبي ، وفي الحدث الاخير هذا يتم كشف نهوض السرعة بوساطة المتحكم الذي بدوره يقلل كلاً من البخار الداخل والقدرة الخارجة ، وذلك بالقاء احمالاً اضافية على المكائن الاخرى مسبباً في تباطىء سرعتها . ومثل هذا التذبذب غير المرغوب فيه والتبادل في القدرة الفعالة بين المكائن يمكن ان يقلل الى ادنى مايمكن بالاعداد المسبق لرفع الاثارة في ماكنة تبدأ بالتعجيل نحو الانزلاق القطبي وتعاد الاثارة عندما تصل زاوية الدوار الى قيمة مناسبة بعدما يأخذ الانزلاق القطبي مكانه . ان سيطرة الاثارة بطريقة بانك – بانك هذه قد اصبحت ممكنة باكتشاف سيطرة اثارة سريعة الفعل تستخدم الثايرستور ، ولكن مازال الوقت مبكراً للتنبؤ فيما اذا كانت التأثيرات الشاملة على منظومة تجهيز يحدث فيها انزلاق قطبي لماكنة كبيرة واحدة او اكثر بدون اثارة من الممكن تحملها ام لا .



الشكل 9.1. مخططات ق.د. مغ المجال

أ) دوار ملفوف تقليدياً

ب) دوار ذو ملف مجزأ

هناك تطوير آخر ذو فائدة هو الدوار ذو الملفات المجزأة الذي يجعل دوار المنوب او زاوية الحمل تبقى ثابتة بصرف النظر عن عامل قدرة الحمل . ان مثل هذا التطوير يسمح للماكنة بامتصاص القدرة الفعالة الى حد التقنين الحراري للساكن من غير اضعاف استقراريتها العابرة . والشكل 9.1 (أ) يمثل مخطط القوى الدافعةالمغناطيسية للمجال لدوار ملفوف بشكل تقليدي حيث رسم هذا المخطط لماكنة نسبة القصر في الدائرة لها تساوي 0·4 (قد يجد الطالب فائدة من الاشارة الى الشكل 3.1 (أ) وفي امكانه أيضاً مراجعة الشكل 7.21 من الجزء الاول) والنقطتان x و y تكونان عند عاملي قدرة مقننين احدهما متأخر والآخر متقدم عند حمل مقنن، او عندما تتغير القدرة المتفاعلة الخارجة للمنوب من x الى y تزداد زاوية حملها من $40°$ الى $98°$ ويتحرك المحور المباشر للدوار من ox الى oy . ويمثل الشكل 9.1 (ب) مخططاً ا . ق . د . مغ

لمنوب مماثل له دوار ذو ملفات مجزأة لها الامبير – لفات نفسها وملفوفة في الشقوق نفسها كتلك التي للّف التقليدي المشار اليه في الشكل 9.1 (أ) . وكما سبق ذكره يكون لكل من x و y خرجان مقننان أحدهما متأخر والآخر متقدم . أما الجزء المتقدم في ملف الدوار باتجاه الدوران فيعطي مجمل العزم الضروري للحمل الكلي MW ويوضح هذا العزم كونه يعمل على ot بزاوية مقدارها حوالي $60°$ مع اتجاه محور اللاحمل للدوار والذي يكون ظاهرياً لمحور فيض الفجوة الهوائية نفسه على مدى الحمل (ذلك لأن هبوط فولتية ممانعة الساكن التسربية يكون حوالي 0·1 الى 0·2 بنسبة الوحدة عند الحمل الكلي). ان الجزء الخلفي او غير الفعال لملف الدوار يسبب نشوء ق . د . مغ F_r باتجاه فيض الفجوة الهوائية ومحور العزم الصفري ويسيطر بذلك على القدرة المتفاعلة الخارجة من المنوب وذلك بتشغيله باثارة مستمرة موجبة أو سالبة .

وعندما يكون الحمل تاماً تكون F_t وهي ق . د . مغ لملف العزم مساوية لـ 0·76 بنسبة الوحدة من F_{fx} (الـ ق . د . مغ المقننة لملف الدوار التقليدي المبين في الشكل 9.1 (أ) وتكون F_{rx} مساوية لـ 0·38 بنسبة الوحدة لعامل قدرة متأخر مقنن أما F_{ry} فتساوي الى 0·5– بنسبة الوحدة لعامل قدرة متقدم المقنن. وعندما تضاف القوة الدافعة المغناطيسية F_{rx} أو F_{ry} لملف غير متفاعل الى F_t . ينتج مجموع كلي مقداره 1·0 بنسبة الوحدة أو 0·67 بنسبة الوحدة على التعاقب وبالضبط مثل F_{fx} أو F_{fy} في الشكل 9.1 (أ) . لذلك فان ترتيبي ملف الدوار التقليدي وملف

الدوار المجزأ يكونان متكافئين في ظروف الحالة المستقرة وتتم السيطرة على اثارة ملف العزم بمنظمات تتجاوب لزوايا الدوار حيث تقوم هذه المنظمات بابقاء زاويـة الدوار عنـد قيمـة 40° تقريباً (أنظر od في الشكل 9.1 (ب)) في كل موضع وعلى مدى قيم حمل الماكنة . أما اثارة الملف المتفاعل فيسيطر عليها بوساطة منظم يتجاوب مع فولتية الطرف للساكـــن .

ان الخاصية المهمة لنظام الملف المجزأ تكمن في ان أي تغيير في القدرة المتفاعلة الخارجة من الماكنة لايحتاج الى تغيير مناظر لموضع الدوار بالنسبة الى فيض الفجوة الهوائية . وهذا يعني انه لايوجد تغيير في زاوية الحمل . وهذا موضح في الشكل (9.1 (ب)) حيث يبين ان موضع الدوار يبقى عند od لتغير في القدرة المتفاعلة من عامل قدرة مقنن متأخر عند نقطة x الى عامل قدرة مقنن متقدم عند نقطة y لحمل كلي مقدراً بالـ MW . ان الاداء المحسن للاستقرارية العابرة لدوار ذي ملف مجزأ يظهر من حقيقة انـه عندما تزداد زاوية الدوار لوجود عطل في المنظومة وتتحرك F_t الى الامام فان الحركة الامامية للقوة الدافعة المغناطيسية في الدوار يتم ايقافها بوساطة منظم الفولتية الذي يسلط اثارة موجبة كلية على الملف المتفاعل . وبعد ازالة العطل يحدث الفعل المعاكس في المنظومة . في الوقت الحاضر يتم تصنيع نموذج عملي لدوار ذي ملف مجزأ لمنوب توربيني قياسي قدرته 500 ميكاواط . وسوف يتم استخدام مثير تيار متناوب مع مقوم ستاتيكي تقليديين في اثارة ملف العزم وسوف تجهز الاثارة الامامية والعكسية للملف المولد التوربيني المتفاعل بوساطة مولد تيار مستمر مسير بصورة مستقلة وله مجالان منفصلان تتم تغذيتهما عن طريق مثير مرشد مدار بصورة ميكانيكية من خلال قنطرتي ثايرستور.

لقد بينت تحليلات الكلفة ان امتصاص الطاقة المتفاعلة من قبل المنوبات التوربينية عالية الخصائص والحاوية على دوّارات ذات ملفات مجزأة تكون كلفته نصف كلفة أجهزة التعويض البديلة . بمقابل هذا يجب وضع مساويء منظومة سيطرة الاثارة الاضافية هذه سوية مع حلقاتها المنزلقة والفرش الكربونية اوالثنائيات الدوارة أوالثايرسترات ومشاكل التمدد والتقلص الخطرة جداً لملفات الدوار نتيجة للعزم والمقاطع المتفاعلة التي لاتحمل التيار نفسه . قد يتم البرهنة على حاجة الاحماء المسبق للملفات قبل الوصول الى السرعة الكلية للدوار ليعطي تمددات متفرقة للمقطعين مساوية الى متوسط أعلى قيم ممكنة متطرفة الناتجة عن التسخين الفرقي الذي سـوف يحـدث أثناء العمـل .

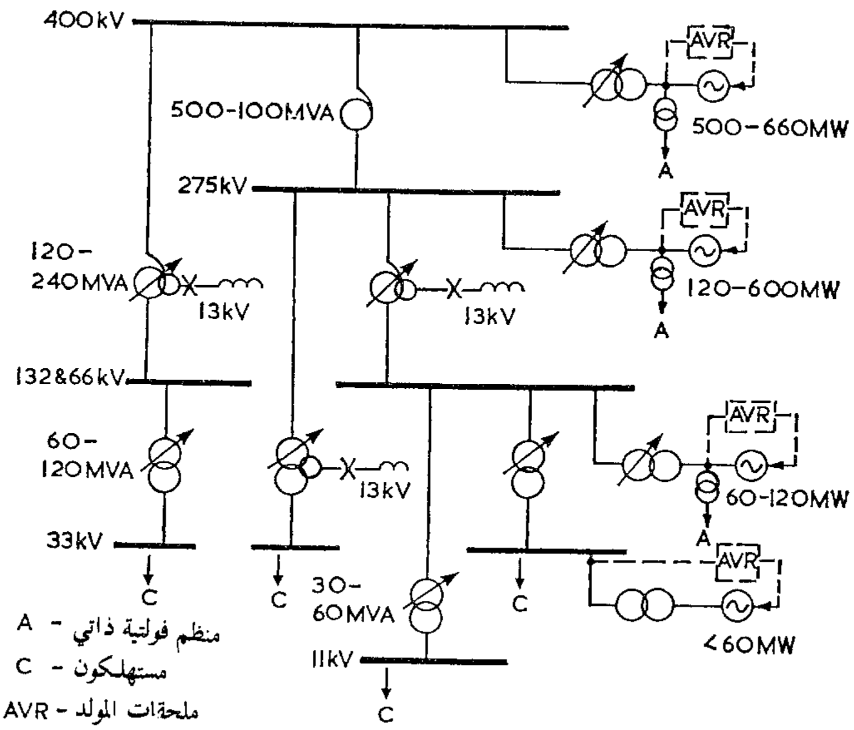
9.3 مقارنة لحالات المنظومة عند الاحمال العالية والواطئة

Comparison of system conditions at high and low loads

ان المشاكل العديدة التي تدخل في تصميم وتشغيل منظومات التجهيز الكبيرة المرتبطة مع بعضها قد يلقى الضوء عليها بمقارنة الحالات التي تتعرض لها هذه المنظومات عند الاحمال العالية والواطئة . وتعد منظومة التجهيز الوطنية في كل من انكلترا وويلز واسكتلندا الجنوبية مثالاً نموذجياً لمنظومة تخدم مساحة تكون الاحمال فيها متضامة وكثيفة جداً . ان لهذه المنظومة أهمية خاصة ذلك لأن قسم التوليد والتوزيع في انكلترا وويلز المسؤولة عنه هيئة توليد الطاقة المركزية هو اكبر منظومة من نوعها في العالم وقد صممت واشتغلت بوصفها كياناً مفرداً لتؤمن الاقتصاد الأعظم .

ان مستويات الفولتية الرئيسية للمنظومة هي كما موضحة في الشكل 9.2 حيث ربطت المولدات الكبيرة وهي الحديثة ذات الكفاءة العالية الى شبكات ذات 400 كيلو فولت و 275 كيلو فولت التي تكون متقاربة في الربط فيما بينها لتكون شبكة فائقة في طول البلاد وعرضها اما المولدات الاصغر والاقدم والاقل كفاءة فتربط الى الشبكات الفرعية المنفردة ذات 132 كيلوفولت و 66 كيلوفولت . حيث يكون معظمها مقرنا مع الشبكة الفائقة عند نقطة واحدة فقط . اما مستويات فولتية 33 ك ف و11 ك ف الموضحة في المخطط . فتمثل شبكات التوزيع المحلية التي تربط الى بعضها المولدات الاصغر والأقل كفاءة .

ان سعة منظومة النقل تكون كافية للسماح بحيث يكون هناك حشد اقتصادي للتوليد ويتحقق اعظم اقتصاد عند تشغيل وتحميل محطات التوليد بموجب كلفة وقودها التزايدية (والتي تكون قليلة للوقود النووي . اماللفحم والزيت فتتناسب عكسيا مع الميكا واط المقننة للمولد) والمدفوعات المستحقة بسبب مفاقيد النقل . قد يكون من الضروري الانحراف بصورة جزئية عن الحالة المثالية هذه لاعطاء امنية كافية لمصدر التجهيز وتجنب التحميل المفرط للدائرة . وكذلك اعطاء سيطرة على الفولتية . تبعاً لذلك فعند هبوط الحمل في المنظومة يتم عزل المولدات ذات الكفاءة الواطئة من الشبكة المحلية ويترك الحمل . عندما يكون خفيفا . ليجهز من قبل المكائن الكبيرة (التي تسمى بأساس – الحمل) المربوطة الى الشبكة الفائقة .



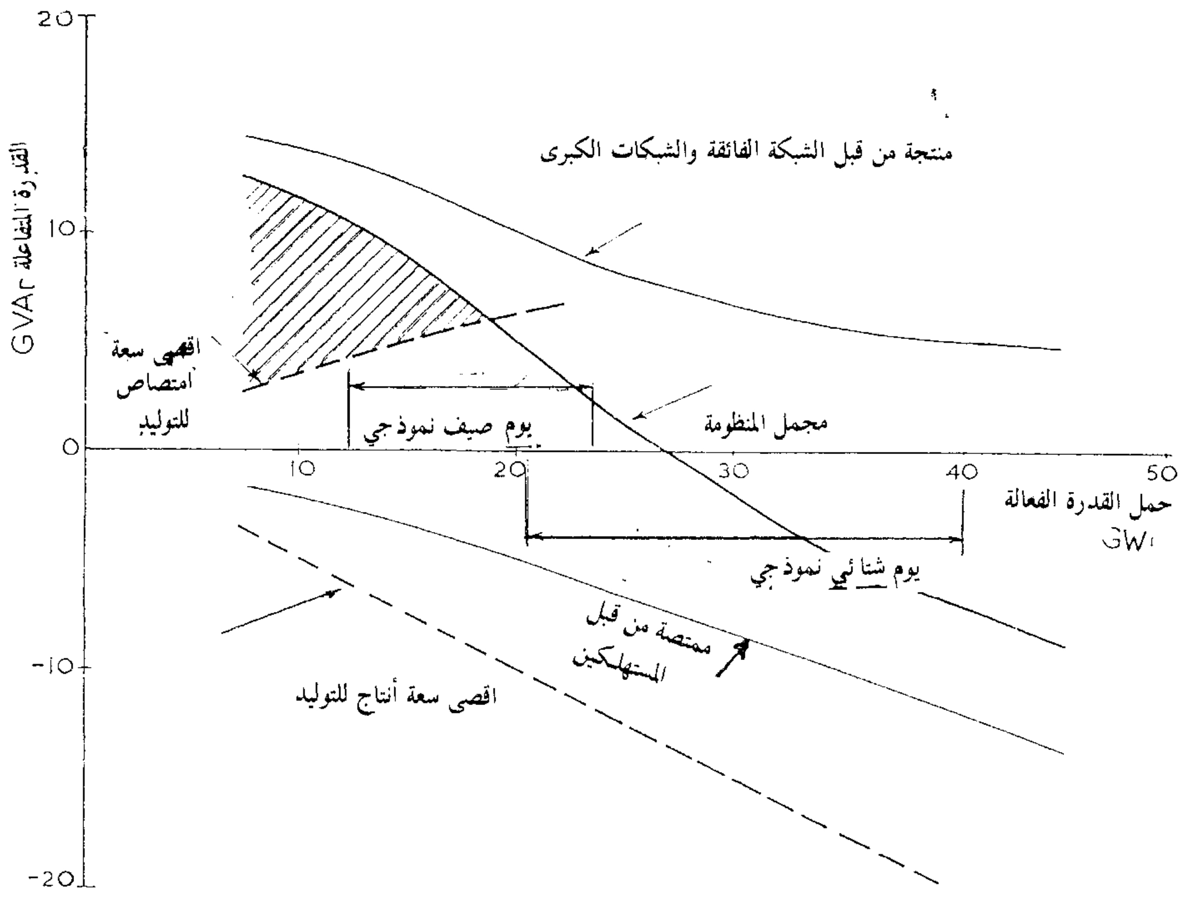
الشكل 9.2 مستويات الفولتية ، وتقنينات المولدات وطرق السيطرةعلى الفولتية في منظومة النقل البريطانيـــة

تتم السيطرة على الفولتية في مختلف اجزاء المنظومة بمنظم ذاتـي في كل مـولد ويوضع هذا ليثبت فولتية الطرف عند القيمة المقننة ، وتوضع ايضاً مآخذ تغييرفـي حالة الحمل (الفقرة6.7 من الجزء الاول) على كافة المحولات عدا تلك التـي تقرن بين اجزاء 275 كيلو فولت و 400 كيلو فولت للشبكة الفائقة وكذلك تلك المحولات التـي تغذي الوحدات الملحقة بالمولدات ومحولات رفع الفولتية للمولدات المربوطـــة الى شبكات 66 لك ف فاقل .

مع ان الفولتيات عند نهايات التجهيز لشبكات توزيع 33 لك . ف و 11 لك ف يحافظ عليها لتبقى بين 100 و 105% من القيمة الاسمية . فان فولتيات الشبكات 132 لك ف و 66 لك ف يمكن تغيرها ضمن مدى أكبر وبكفاءة . ويتم الحفاظ على فولتيات الشبكة الكبرى باعلى قيمة عملية عند اوقات الحمل العالـي لتقليل مفاقيد I^2R وانتظام الفولتيــة نتيجة لقدرة الحمل المتفاعلة كما نصت عليه الفقرة 1.5 من الجزء الاول عندما درست

تعويضات القدرة المتفاعلة . وخلافاً لذلك فأن فولتية الشبكات تبقى باقل قيمة عملية في الاوقات التي يكون الحمل فيها قليلاً لتقليل القدرة المتفاعلة الناتجة عن متسعة التوازي للشبكات . وهذه تكون مهمة وبصورة خاصة للشبكات التي تحتوي قابلوات ارضية . وبما ان الشبكات الفائقة ذات 400 ك ف و 275 ك ف تكون مقترنة فيما بينها بمحولات ذات نسبة ثابتة ، فليس بالامكان عمل سيطرة مستقلة على فولتياتها العامة . وفي اوقات الحمل العالي للمنظومة يتم استبقاء فولتية الشبكة الفائقة باعلى قيمة عملية ، الحدود العليا التي يفرضهاالعازل ، فتكون 420 ك ف و300 كيلوفولت . في اوقات الحمل الواطئة للمنظومة حيث تشتغل الشبكة الفائقة بصورة جيدة عندما يكون الحمل عليها اقل من حملها الطبيعي (راجع الفقرة 1.6 من الجزء الاول) وتكون منتجاً عظيماً للقدرة المتفاعلة التي يمتص اغلبها من قبل مولدات الحمل الاساس المربوطة مباشرة الى هذه الشبكة . وتكون فولتيات الشبكة الفائقة المثالية اقل بقليل من القيم السائدة عند الاحمال العالية ذلك لأن الادخار في القدرة المتفاعلة التي تنتجها الشبكة الفائقة عند فولتيات واطئة يكون اقل من الاختزال في سعة الامتصاص للمولدات نفسها .

يبين الشكل 9.3 القدرة المتفاعلة اللازمة لمنظومة النقل لهيئة توليد الطاقة المركزية وكذلك لمنظومة توزيع المستهلكين (هيئة مناطق الاحمال وشبكات التوزيع) في بداية السبعينات رسمت بمقابل احتياجات القدرة الفعالة للمتسهلكين . يوضح الشكل ايضا انتاج اقصى قدرة متفاعلة وسعات الامتصاص للتوليد الذي يربط على الشبكة لمواجهة الحمل الفعال . وهذه السعات تستند الى مولدات مصممة لتزود قدرة مقننة MW عند عامل قدرة متأخر 0.8 . وتكون قادرة في حالة تقليل اثارتها (الاثارة الواطئة) على الاشتغال المستمر عند زوايا حمل تزداد الى قيمة 75° (راجع الفقرة 7.8 و 7.9 من الجزء الاول) ومن الملاحظ ان تغير القدرة المتفاعلة الكلية للمستهلكين والمنظومة يكون بحوالي نصف تغير القدرة الفعالة . وفي الاوقات التي يكون فيها حمل المنظومة عاليا فان متطلبات القدرة المتفاعلة للمستهلكين تواجه جزئيا من قبل المنظومة نفسها ولكنها تواجهه بصورة رئيسية من قبل المولدات ذات الاثارة المفرطة . لذلك يكون تدفق القدرة المتفاعلة من المولدات ومنظومة النقل الى المستهلكين . وكذلك تضبط مآخذ التغيير في المحولات لتسمح بحدوث هذه التدفقات ضمن حدود فولتية مقبولة .



الشكل 9.3 متطلبات القدرة المتفاعلة للمنظومة وسعة التوليد في انكلترا وويلز

وعند اوقات الحمل الواطىء على المنظومة ، فان القدرة المتفاعلة التي تنتجها منظومة النقل تكون عدة مرات بقدر القدرة المتفاعلة التي تمتص بوساطة المستهلكين ويفوق الفائض منها سعة الامتصاص لمولدات الحمل الاساس التي يتم الحصول عليها في حالة الاثارة الواطئة . تبين المساحة المظللة اقل سعة للامتصاص والتي يجب ان تجهز بوسائل اخرى عند الحمل الواطىء . ان سعة الامتصاص الاضافية تكون في الحقيقة اكثر من هذه الكمية ، لذلك وجب وضع الترتيبات اللازمة لاخذها بنظر الاعتبار في مرحلة التخطيط الاساسي للمشروع ، وذلك لتحديد تزايد الفولتية عبر المحول ذي النسبة الثابتة 400/275 ك‌.ف ، وتغطية حالات الحوادث غير المتوقعة مثل عطل مولدات معينة او عدم وجودها نتيجة الصيانة الدورية لتشارك في عملية الامتصاص وكذلك الاخفاق في تخمين اطوال القابلوات لاعمال التوسيع المستقبلية وايضا تجهيز الاحتياط الديناميكي Dynamic reserve.

ان الطرق المتيسرة لتوفير سعة الامتصاص الاضافي وحسب تسلسلها الدوري التصاعدي للكلفة هي : فصل الدوائر غير الضرورية (خاصة القابلوات) ، وجعل مآخذ التغيير في المحولات المربوطة على التوازي مترنحة (مرنة) ، نصب ملفات مفاعلة تفرعية وتشغيل التوليد ذو المزايا الواطئة عندما يكون الحمل ادنى مايمكن . ومع ان فصل الدوائر غير الضرورية لاتتضمن كلفة مالية مباشرة الا انها تعمل على اضعاف الاستقرارية العابرة للمنظومة وذلك بزيادة الممانعة بين المولدات . كما تم بيانه في الفصل 3 . ان ترنح مأخذ التغيير في المحولات المربوطة على التوازي يعمل على امتصاص القدرة المتفاعلة بفعل التيار الدوار خلال مفاعلات المحولات . (انظر الفقرة 6.4.2 من الجزء الاول) . يكون تاثير هذه الطريقة اكثر في مجموعة محولات تتألف من ثلاث او اربع محولات من تلك المجموعة المكونة من محولين فقط . لانه نتيجة لتغيير خطوي (مفاجيء) معين في فولتية المستهلك الذي يتبعه فقدان محول واحد فانه يسمح في المجموعات ذات المحولات الاكثر عددا بترنحات كبيرة في المأخذ . وهذه الطريقة لها ميزة جذابة في كونها لاتستوجب رأس مال معين وكذلك فانها تعمل على الاستفادة القصوى من سعة الـ MVA للمحول لامتصاص القدرة المتفاعلة . وذلك في الاوقات التي يكون فيها الطلب على الحمل لهذه السعة ادنى مايمكن . ومع ان الملفات المفاعلة المربوطة على التوازي والتي نوقشت في الفقرة 1.5.1 في الجزء الاول تتطلب كلفة رأس مال اضافية الا ان مزاياها تكمن في كلفة تشغيلها المنخفضة وسهولة السيطرة عليها . وفي الحالات الاعتيادية تربط وحدات قدرتها المتفاعلة 66 MVAr الى ملفات ثالثية ذات 13 ك‌.ف

لمحولات الشبكة الفائقة عن طريق قواطع الدورة ، على الرغم من ان وحدات قدرتها المتفاعلة 100 MVAr اواكثر ربما تربط على التوازي مع دوائر القابلوات الطويلة ذات 275 ك ف . وحجوم هذه الملفات المفاعلة يجب ان تكون مناسبة بحيث انها يمكن ان تربط (تؤقلد) الى المنظومة بدون احداث تغيير في الفولتية قد يزيد على 3% من قيمتها في الظروف الطبيعية و 6% تحت ظروف العطل .

توجد حالات يكون خلالها من الارخص تجهيز سعة الامتصاص المطلوبة خلال فترة قصيرة من الزمن وذلك لتشغيل المولدات ذات المواصفات الرديئة باثارة دونية (واطئة) عندما يكون الحمل الفعال في ادنى قيمة له والذي يمكن تجهيزه بمراجل التسخين . ان الاحتياط الديناميكي الضخم للقدرة المتفاعلة يجب ان يحمل في جميع الاوقات على وحدات المحطات الدوارة لغرض تعويض الطلب على القدرة المتفاعلة الناتجة عن فقدان دائرة أو دائرتين اواكثرمن الدوائرالمربوطة على التوازي في اوقات حمل المنظومة العالي ، اوخسارة مولد يشتغل باثارة واطئة او ملف مفاعل تفرعي في اوقات الحمـــل المنخفض للمنظومة .

يوضح الشكل 9.3 التغير في القدرة الفعالة والمتفاعلة في ايام نموذجية من الصيف والشتاء . في كلتا الحالتين يهبط حمل القدرة الفعالة الى اقل مايمكن خلال الليل ويبقى قريبا من الذروة بين الساعة 8.00 صباحا و 10.00 مساءً . اما التغير من اقل حمل الى مايقارب اقصاه فيحدث في ساعتين تقريبا . وخلال هذه الفترة يجب تشغيل ومزامنة وتحميل مولدات اضافية تدريجيا وتتخذ الخطوات اللازمة للحفاظ على فولتية الشبكة ضمن الحدود المقبولة . وذلك بفصل الملفات المفاعلة التفرعية عن المنظومة . وتقوية اثارة المولدات . وتنظيم مأخذ التغيير للمحولات . ويتم اتخاذ عكس هذه الاجراءات بين الساعة 10.00 مساءً و 2.00 قبل الفجر .

يتضح مما قلناه سابقا ان السيطرة على فولتية المنظومة بايجاد حالة توازن بين عملية انتاج القدرة المتفاعلة وعملية امتصاصها هي عملية تكون معقدة اكثر في اوقات الحمل المنخفض للمنظومة منها عندما يكون الحمل عليها عاليا . ومما يجب ملاحظته ايضا ان المولدات تميل الى امتلاك استقرارية ديناميكية قليلة في الاوقات التي يكون فيها الحمل واطئا في المنظومة وسبب ذلك يعود الى ممانعتها العالية بالنسبة لممانعة الجزء الباقي في المنظومة بعد ازالة العطل (قد يكون هذا ايضا بسبب فصل الدوائر غير الضرورية) وقد يكون كذلك بسبب اشتغال المولدات حينئذ باثارة ضعيفة . على هذا الاساس تكون ازمنة

ازالة العطل الحرجة لعملية الحماية وقواطع الدورة عموما اقل مايمكن في اوقات الحمل الواطيء .

ان النشاطات الواسعة التي تدخل في تصميم وتشغيل منظومة تجهيز متكاملة لغرض مواجهة احمال القدرة الفعالة تتغير حول نسبة معينة مرة اومرتين في كل 24ساعة ، اخذة بنظر الاعتبار الناحية الاقتصادية والمعولية ، قد فتحت المجال امام الاهتمام في امكانيات متعددة لتطبيقات الحاسبة الالكترونية وخاصة في التعامل مع التغيرات السريعة في متطلبات القدرتين الفعالة والمتفاعلة والتي تحدث مرتين في اليوم .

9.4 تطبيقات الحاسبة الالكترونية في منظومات القدرة

Computer applications in power systems

تستخدم الحاسبات الرقمية لكلتا حالتي على الخط وخارج الخط في تصميم وتشغيل منظومات توزيع القدرة ، كما جاء في الفقرة 8.1 ، لقد اصبحت مشاكل تصميم منظومة القدرة معقدة جدا بسبب صعوبة تنفيذ الحسابات يدويا وذلك في العشرينات من هذا القرن ، وقد استخدمت محللات الشبكة الى حد ظهور الحاسبات الرقمية في نهاية الاربعينات من هذا القرن وسببت في زحف حسابات التصميم اكثر واكثرمن النماذج الى الحاسبات . وبالمشابهة اصبحت مشاكل التشغيل اكثرتعقيدا بحيث بات من الضروري مساعدة مهندسي التشغيل بوساطة الحاسبات الرقمية لاستهداف الاقتصاد الاكبر. واخذت هذه في البداية صيغة تجهيز المشغل بمعلومات تستند على حسابات بيانات منقولة الى مركزالسيطرة من عدة نقاط في المنظومة ، حيث تؤدي على المدى الابعد في تموين سيطرة مغلقة ذاتية مثلى لاوجه كثيرة من السيطرة على المنظومة . ومنظومة التجهيز البريطانية تختلف باوجه متعددة عن منظومة الولايات المتحدة المتكاملة وعن المنظومة الوطنية المترابطة في اوربا ، وذلك بكونها منظومة متكاملة تماما ولاتحتوي بصورة ظاهرية على محطات هيدروكهربائية موجودة لاغراض التنظيم ، والتي فيها يجب ان يولد الحمل بافضل طريقة اقتصادية مع ضمان احتياطي دائر امين باقل مايمكن (تكون مجموعات السعات الاحتياطية مربوطة الى المنظومة مباشرة) ويجب الوصول الى توازن اقتصادي ، فمثلا بين امتلاك سعات توليد كثيرة جدا وعدم امتلاك احتياطي كاف ضد هبوط التردد اوحتى فشل تجهيزالقدرة ، ان احد الضرورات الاساسية لاتشمل

فقط ان يوزع الحمل بصورة اقتصادية دائما بل اضافة لذلك يجب ان يكون توزيعه بطريقة تسمح بمواجهة تغيرات الحمل بسرعة كافية . بحيث ان طرق تخمين الحمل (والتي سوف نتطرق عليها في الفقرة القادمة) يجب ان تحسن . هذا بالاضافة الى انه كلما حصل تقدم ملحوظ نحو استخدام السيطرة ذات الدائرة المغلقة (على الخط) فان التخمينات يجب ان تتم بسرعة اكثر ولفترات قصيرة مقبلة . ان زيادة الدقة في التخمين تمكن من عمل تخفيف في الاحتياطي الدائر الذي يوجد للتغلب على الاخطاء في تكهن الحمل المستقبلي . وكذلك تزايد الحمل الحقيقي نتيجة الطلب واضافة المعدات اللازمة علاوة على فقدان أكبر مغذيات قدرة في المنطقة .

في حالات تخمين الحسابات خارج الخط (الخطوط المفصولة) او في النماذج التخمينية تستخدم الحاسبات للحسابات اللازمة للشبكات الكبيرة وتشمل سريان الاحمال ومستويات العطل لمعدات الاقلدة وكذلك مناسيب الفولتية واستقرارية المولدات ان سريان الحمل الذي نوقشت المباديء الأساسية لحساباته في الفصل 8 . يكون ضرورياً لمعرفة فيما اذا كانت دائرة من الدوائر مفرطة التحميل في الوضع الطبيعي وكذلك عندما تكون دائرة واحدة او اكثر خارج الخدمة لأجراء عملية الصيانة عليها او كان خروجها نتيجة عطل . وتبين الفقرة 8.6.2 كيف يمكن لبرنامج الحاسبة من اجراء الفحص الاخير هذا مباشرة .

ان مستويات العطل التي تتعرض لها معدات الاقلدة . (راجع الفقرة 8.4.8 و 8.4.9 من الجزء الأول) تتم مقارنتها بتقنين جهاز الاقلدة نفسه . واذا تجاوزت قيمة الأخير ، عندئذ قد يستوجب عمل بعض الترتيبات اللازمة في الشبكة . ويجب الانتباه الى منسوب الفولتيات حيث أن ذلك مهم خاصة للشبكات ذات الفولتيات العالية جداً والتي تصمم بصورة عامة لتعمل ضمن حدود ضيقة نسبية للفولتية . ولتجنب الاجهاد المفرط للمواد العازلة أومفاقيد النحاس الكبيرة عند الفولتية الواطئة . بما ان استقرارية المولد التي نوقشت في الفصل تتأثر بترتيبات الشبكة وكذلك بزمن ازالة العطل وبالقصور الذاتي للماكنة وبمفاعلات الماكنة اضافة الى ظروف تحميل الماكنة نفسها فقد يكون من الضروري اجراء فحص الحالات التي يتم فيها مخالفة الحدود الطبيعية . كالترتيبات الخاصة للشبكة أو خطر اطالة زمن ازالة العطل غير الأعتيادي .

أما التطبيقات الأخرى لحالة خارج – الخط (off-line) والتي تم تطويرها أوهي الان في مرحلة التطوير فهي الجدولة الاقتصادية لمحطات التوليد ، وكلفة انقطاعات

الدوائر ، وتخمينات الطلب وضمن المعلومات ، والاستردادات وكذلك التحليل . ان أكثر الانماط الاقتصادية للتوليد المرتبط بالشبكة في فترة من الزمن يجب ان ياخذ بالحساب الاحمال المخمنة الحقيقية وكلفة انتاج القدرة في كل مولد ، كذلك تجنب التحميل المفرط للدوائر وتأثير الأعطال على أمن الشبكة . ويستوجب التخطيط المسبق لاخراج الدوائر لتجنب ازدياد كلفة التوليد الكلية ، وقد يؤدي اخراج الدوائر لاغراض الصيانة أو الأعطال أما الى تحديد القدرة الخارجة من التوليد ذي الكلفة الواطئة أويؤدي الى ضرورة تشغيل التوليد ذي الكلفة العالية لضمان التجهيز لأجزاء معينة من الشبكة .

ان تخمينات الطلب يجب ان تتحسب لعوامل الظواهر الجوية مثل الحرارة ، الريح الأنارة وترسبات الرطوبة اضافة الى ساعات النهار وأيام الأسبوع . وتخزن بيانات الشبكة في الغالب على شريط مغناطيسي وتكون جاهزة عند الطلب لأجل استخدام الحاسبة في فحص سريان الأحمال ، ومستويات العطل ومناسيب الفولتية وجدولة محطات التوليد التي يمكن ان تصنف أو تحلل بالحاسبة عند الطلب . يمكن استخدام الحاسبة أيضاً في تحليل بيانات عطل الشبكة وكذلك اداء الحماية ، في هذه الحالة تغذى معلومات كاملة حول كل حادث عطل الى الحاسبة وهذه بدورها تعطي التحليلات اللازمة للمعلومات المخزونة عند فترات زمنية منتظمة او عند الطلب .

واستخدمت الحاسبات بصورة واسعة ومتزايدة في مشاكل تصميم وتشغيل منظومات التوزيع واليك مثلين على ذلك (أ) في التصميم الأمثل لموزع شعاعي متفرع ذو فولتية واطئة باستعمال احجام قابلوات قياسية اخذاً بنظر الأعتبار تحديدات هبوط الفولتية والتقنينات الحرارية . وتثمين المفاقيد من الناحية المالية وعوامل التباين (التنويع) والتحميل غير المتوازن (Snelson و Carson ، 1970) ، و (ب) في تثمين أمنية منظومات التوزيع في ايجاد طرق بديلة لمسارات التجهيز تحت الظروف الطارئة (Pragnell و Cory – 1970) .

ان تطبيقات الحاسبات لحالة على الخط On-line او تطبيقات الزمن الحقيقي لاشتغال منظومة نقل هي آخر ماتم التوصل اليه من تطورات في الوقت الحاضر . هذه التطبيقات تتضمن تدوين البيانات بشكل مرتب وتحليل الانذارات وكذلك منظومة سيطرة مدعومة بالحاسبة ، وهذه هي منظومات الدائرة المفتوحة التي تزود مهندسي السيطرة بآخر المعلومات التي هي بمثابة المفتاح للعمل بصيغة سهلة بحيث تجعل المهندس

يتخـذ قـرار الفعل الصحيح ، مثلا مركز السيطرة الوطني الجديد لهيئة توليد الطاقة المركزي في لندن يستخدم حاسبتين رقميتين من ذوات السرعة العالية حيث تخزن فيها معلومات على – الخط لحوالي 1000 مقياس لتدفق القدرة و 5000 جهاز (قواطع الـدورة ، الفواصل ومرحلات التيار المفرط) ، وتعرض هذه المعلومات عند الطلب على 12 شاشة كاثودية اما الرموز الضرورية لعمل المخططات فتولد بالحاسبات . ومع ان البيانات لآخـر دقيقة لعموم منظومة الشبكة الفائقة تثبت على شكل صورة فسيفسائية كاملة في جهاز الخزن للحاسبة فانه يتم عرض سدس هذه الصورة على الشاشة . يكون مع كل شاشة ذراع ادارة بحيث يكون بالامكان تدويره باستمرار لاظهار ذلك الجزء المطلوب المكمل للصورة ، الفسيفسائية ، بصورته الكاملة مع سريان الاحمال على – الخط أو أي مؤشرات للتيار المفرط ، أمـا المعلومـات التاليـة لحـالات المنظومـة فيمكـن ان تعرض عند الطلب : منسوب فولتية الشبكة ، التوليد والطلب على مستوى القطر أو لمساحة معينة وتحويل الطاقة ضمن المناطق ، ،كلف التوليد بمجموعات المربحة وغير المربحة . الجمع المستمر لتدفق القدرة على مجموعات الى حد 20 مغذياً والتبليغات الذاتية من تشغيل معدات الاقلدة والتيارات المفرطة ... الخ ، وتخزن بيانات على – الخط لفترات زمنية من دقيقة واحـدة والى حد 30 دقيقة ، بحيث يمكن اعطاء صوراً حية عن ظروف المنظومة لغاية حـدث طاريء لغرض دراستها ، ويكون ذلك مسجلا بصورة دائمة لغرض اعادة عرضها . ان الحسابات الأمينة لتدفق القدرة على – الخط وكذلك مستويات الدائرة القصيرة تحت ظروف الانقطاعات الحقيقية والمجدولة يتم الان عملها بصورة دورية لعموم منظومـة الشبكة الفائقة في كل ثلاثين دقيقة ، واذا ظهر أي تحميل مفرط لدائرة أو اجهاد مفرط ، لقاطع الدورة يتم تشغيل جهاز انذار ، وتظهر على الشاشة الـكاثودية الحالات غير الاعتيادية ويمكن معرفة التفاصيل . بذلك تتحقق معرفة تحسين تقديرات الامنية في الدراسـات المثلى للمنظومات (راجع المناقشة في ورقـة بحث لـ Shen و Laughton) .

وامثلة في تطبيقات الدائرة المغلقة لحاسبة تعمل على – الخط هي الاقلـدة الذاتية في المحطات الثانوية لبدء التشغيل الذاتي او تحميل وايقاف وحدات مولد توربينـي مرجلي في محطات القدرة وسيطرة المنطقة الذاتية . ان الاقلدة الذاتية بدون استخدام الحاسبات هي شائعة عمليا في شبكات الضغط العالي لـكن وضع حاسبات صغيرة في المحطات الثانوية الـكبيرة والمهمة يجعلها في وضع تتعامل فيه مع كثير من الحالات الطارئة المتنوعة بحيث يمكنها شمول وسائل ادنى مثل اسقاط حمل منتخب وتحليل الانذارات . ان سيطرة المنظومة الذاتية تشمل توفير جهاز مسيطر الماكنة يربط الى متحكم التوربين لـكل

وحدة توليد مسيطر عليها ويسيطر على المسيطرات نفسها ذاتياً بالنقل السلكي من حاسبة سيطرة العمليات المركزية ، وتسيطر الحاسبة على القدرة الخارجة لكل مولد بجدارة ، وتفحص تدفق القدرة على دوائر النقل لضمان تشغيل امين . ويمكن استخدام الحاسبة لحساب الطلب المتوقع لساعة واحدة الى الامام ، ويبرمج الحمل على كل مولد لمواجهة الطلب باقتصاد اقصى وبتشغيل امين . وقد تم اختبار التشغيل لمثل هذه المنظومة الذاتية لتوزيع الحمل بنجاح على جزء من المنظومة الكبرى البريطانية حيث اشتمل هذا الجزء على 31 مولداً في ست محطات قدرة بسعة كلية مقدارها 1600 ميكاواط ، وهذا موضح في المراجع المدونة من قبل Farmer وزملائه–1969 . وفي هذه التجربة الابتدائية فقد تم استبعاد الاقلدة الذاتيةلكونها غير ملائمة في هذه المرحلة، وكذلك استبعدت السيطرة على الفولتية ذلك لان الفوائد الاقتصادية لجعل عملية تدفق القدرة المتفاعلة التي في حالتها المثلى كانت اقل من تلك التي للقدرة المحملة . ويبدو على الارجح ان سيطرة المنظومة الذاتية تمتد لتشمل التجهيز الامثل للاحتياطي الدائر لتغطية الاخطاء في تخمين الطلب والفقدان المفاجيء لأكبر المولدات على المنظومة ، والسيطرة على تدفق القدرة المتفاعلة وفولتية المنظومة بضبط مناسب لاثارة المولد ومآخذ تغيير المحولات على الحمل .
ومن الامكانيات الأخرى لاستخدام الحاسبة هو اختيار التجزئة المثلى للمنظومة في حالة حالة حدوث عطل لم يتم ازالتة بالحماية الاعتيادية اوالحماية الساندة (الاحتياطية) .
وفي المنظومات الكبيرة ذات التفرعات الشبكية الكثيرة فان نمط التوليد يكون متغيراً بصورة مستمرة ، لذلك يؤخذ في الحساب تدفق القدرة في الشبكة قبل حدوث العطل مباشرة ، ويكون من الممكن اختيار نقاط تجزئة بحيث يتم رفع العطل المستمر في المنظومة باقل اضطراب للمستهلكين ، ومجمل القول فان مجال تطبيق الحاسبة في تصميم وتشغيل منظومة القدرة اخذ بالتعمق وهناك امكانيات مثيرة ومتعددة تحت الدراسة .

9.5 التنبؤ بالحمل Load prediction

ان الجزء الجوهري في تطور مشاريع ذات السيطرة بالحاسبة هو التكهن بالطلب اللازم لاجل حساب اقتصاديات جدولة التحميل وكذلك لاجل تثمين أمنية المنظومة .
وتنبؤ– المدى – القصير يمكن ان يوفر تكهناً لكل بضع دقائق يمكن ان يتم وفقها تغيير الحمل في محطات القدرة . اما تنبؤ– المدى – البعيد لحد ساعتين زمنيتين مستقبلا ويعاد حسابه كل نصف ساعة فيمكنه اعطاء تحذير متقدم الى المحطة التي من المتوقع ان تتغير

عليها الاحمال والذي يمكن أيضاً من اتخاذ اجراء مؤقت في حالة فشل منظومة السيطرة ، وهذا يوفر وقتاً لتخطيط التحميل لمواجهة ذرى الطلب بدون تجاوز النسب القصوى المسموح بها لزيادة الحمل ، ان التنبؤ بما يحدث للحمل خلال 8 الى 12 ساعة مستقبلا يكون في منظومة تكون جميع طواقم التوليد فيها حرارية تقريباً ، حتى تتمكن من اعطاء معلومات لغرض البدء بتشغيل أو ايقاف طواقم التوليد لمواجهة دورة الطلب اليومية . وكلما كان تكهن الطلب أبعد من ناحية الزمن شمل معلومات حيوية على التنبؤات الجوية ان الطرق المختلفة المطبقة حاليا في التنبؤ للحمل على المدى القصير (Farmer و Potton 1968 ، Matthewman و Nicholson 1968 و Toyoda وأخرون 1970) لا تشمل بيانات الأحوال الجوية بسبب صعوبة الحصول عليها بالصيغة المناسبة وتغذية الحاسبة بتغيرات هذه البيانات ضمن المدى القصير (وقد تكون هـــذه البيانات غير موثوق بها) وبسرعة كافية لتعطي تخمينات التحميل المفصّلة والدورية المطلوبة. والطرق التي تعتمد على ادخال البيانات الخاصة بتغيرات الحمل السابقة والتي تكون متسيرة وجاهزة في الصيغة المطلوبة للحاسبة ، وجد انها تعطي تخمينات دقيقة نسبيا للمدى القصير مع انه لايمكنها من التنبؤ بالطلبات الخاصة كتلك التي تظهر احيانا بالمناسبات ، مثال على ذلك تلك التي تظهر من استجابة عدد كبير من المستهلكين للاذاعة والتلفزيون خـلال ساعات الظلام . ان التحسينات في معدات القياس من بعد على – الخط يجب ان تعطي بيانات اكثر دقة عن التحميل السابق . اما تحويل الاساليب التخطيطية لترابط التأثيرات الجوية الى دخل الحاسبة فهي الان في دور التمحيص والبحث . على هذا الأساس فان هناك تقدما من المحتمل عمله في تنبؤ المدى القصير وذلك بتوحيد التخمين لما قبل التحميل سوية مع البيانات المبينة على الطقس وربما يضاف ايضا السماح لتأثير العوامل النفسية عند الضرورة بوساطة خبراء متكهنين في الموضوع وهناك حاجة ماسة الى تحديد اصغر سماح ممكن في تخمين الطلب لان وجود خطأ ولو بنسبة مئوية قليلة في الحمل المخمن لمنطقة معينة قد يكون جزء كبيراً من القدرة الخارجة لاحد المولدات. ان الحصول على دقـــة مناسبة في الحالة عندما يكون التنبؤ جزء من برنامج على – الخط لتوزيع الحمل هو اكثر صعوبة في تجهيز بيانات سلسلة نسبيا في حالة حسابات خارج الخط والتي تعطى بشكل معدلات القيم لـكل نصف ساعة وعلى مساحات كبيرة (Farmer و Potton 1962) . على هذا الاساس يكون من الضروري بذل جهد استثنائي في اساليب التنبؤ على – الخط على أنه جزء يدخل في تطوير السيطرة الذاتية في منظومات القدرة ، مع ذلك فانه ليس بالامكان مطلقا التنبؤ وبثقة تامة عما سوف يحدث من متغيرات على المدى القصير

في احتياج المنظومة بحيث لايستطيع التنظيم المسبق على الاطلاق ان يحل محل تنظيم الدائرة المغلقة مع عمل التصحيحات للتأثيرات المنظورة .

9.6 المشاكل التي ترافق نقل التيار المتناوب بفولتية عالية فائقة

Problems associated with E.H.T. A.C. transmission

لم يتم لحد الان الوصول الى قرار فيمااذا كانت هناك حاجة الى شبكة نقل جديدة تشتغل بفولتية أعلى من 400 ك ف لمواجهة نمو الحمل في بريطانيا في المستقبل القريب . ان كل جهد يبذل هو لايجاد حلول بديلة اكثر اقتصادية ، ولكن اذا كان لابد من انشاء هذه المنظومة الجديدة فمن الارجح ان تكون الفولتية بحدود 1100 ك ف وعلى الارجح فانها لن تكون في الخدمة قبل حوالي منتصف الثمانينات ؛ وفي بريطانيا فان استخدام هذه الفولتية في خطوط علوية معلقة قد تكون محددة بسبب تأثيرها الشديد على السلامة العامة ، ويجب اتخاذ اجراءات لازمة للحصول على توزيع مرضي للفولتية عبر العوازل السلكية الطويلة المطلوبة تحت شروط التلوث الجوي (راجع الفقرة 4.1.1 من الجزء الاول) .

وكما تمت مناقشته في الفقرة 2.8 وكذلك في الفصل 5 لاتكون الصواعق مشكلة بالنسبة لمنظومات الفولتية العالية الفائقة كما هي الحالة في المنظومات الاوطأ فولتية ، ذلك لان تمورات الصواعق نادراً ماتصل الى شدة التحمل الدفعية لعوازل المنظومة ، في حين ان تمورات الاقلدة والتي تنسب الى فولتية المنظومة تصبح مهمة جداً . وكما نوقش ايضاً في الفقرة 5.4 فان فولتيات الشرر العرضي بفجوات هوائية طويلة أو لعوازل المنظومة قد تكون منخفضة لحد ملموس لجبهة موجة تمور مقدارها حوالي بضع مئات من اجزاء المليون من الثانية (وهي نموذجية لكثير من تمورات الاقلدة) بالمقارنة مع الشرر العرضي لزمن جبهة موجة الصاعقة القصير نسبياً) او لازمان جبهات موجة أطول للفولتيات المفرطة التي يكون ترددها مساوياً لتردد المنظومة ، هذا الانخفاض في جهد الانهيار للفجوات الطويلة والعوازل تحت ظروف تمورات الاقلدة قد ينتج حداً نهائياً لفولتيات النقل التي قد تستخدم في المستقبل ؛ وقد ظهرت بعض الاقتراحات حول هذا الحد النهائي بان يكون حوالي 1500 ك ف . وكما يشير الشكل 5.3 فان فولتية الشرر العرضي لعوازل منظومة الفولتية

العالية الفائقة وعند جبهات موجة لها زمن يعادل بضع مئات من ميكروثانية ، يمكن أن تكون بالتقدير أقل للموجات الموجبة منها للموجات السالبة (مع ان شدة التحمل الرطبة السالبة للروابط العمودية قد تكون مساوية او اصغر من شدة التحمل الرطبة الموجبة) . لهذا السبب فقد جرت دراسات لتطور ضربات الصواعق الموجبة الرئيسية في المجالات غير المتماثلة وغير المنتظمة في السنوات الاخيرة . ومن الواضح هنا ان الهالة التي تسببها ذروة فولتية الطور العاملة يجب تجنب حدوثها على معدات النقل ، وللمرحلة هذه جرت دراسات عن خواص مثل هذه الاجهزة لاستعمالها من أجل حماية نهاية رابط العازل ضد الهالة الكبيرة (Aleksandrow وزملائه ، 1970) .

أما النشرات العلمية الامريكية الحديثة حول موضوع تمورات الاقلدة وكذلك توصيات لجنة معهد المهندسين الكهربائيين والالكترونين (I.E.E.E.) الامريكي فقد أعدت تقريراً وتم نشرها ضمن القسم الثالث منه في سنة 1970 . ان الاتجاه العام في تصميم المنظومة هو تحديد مستويات تمور الفولتية عند اقلدة الخطوط العلوية المعلقة لقيم قصوى للفولتيةقد تصل الى حوالي 1·5 الى 1·7 بنسبة الوحدة من ذروة فولتية الطور : واقترح ضمن التقرير السالف تحديداً لهذه الفولتية بحيث لايتجاوز 1·5 بنسبة الوحدة . والطرق التي يمكن من خلالها تقليل فولتيات الاقلدة تتضمن استخدام مقاومات ذات قيم متعددة ومتدرجة (راجع الفقرة 2.12 حيث تمت الاشارة الى مقاومات احادية التدرج) وكذلك تشمل هذه الطرق مقاومات تتغير مع الزمن ، والتزامن المتطور جداً لغلق الاقطاب الثلاثة في معدات الاقلدة جميعها (راجع الفقرة 2.12) . ويتضمن تصميم عوازل الخط العلوي المعلق للفولتية الفائقة وما قد يصل اليه تحديد تمورات الاقلدة ، معلومات احصائية عن الشرر العرضي الممكن حدوثه ، مثال على ذلك قد تأخذ اسس للتصميم بحيث يكون هناك شرر عرضي واحد لتمور اقلدة لكل الف حالة تشغيل لقاطع الدورة أو شرر عرضي واحد خلال فترة معينة ومعلومة من الزمن . وقد اخذ أحد البحوث هذه الفرضية بنظر الاعتبار (Hileman ، والاخرين ، 1970) وتم في ضوئها ايجاد اداء خط معرض لتمورات اقلدة لانواع معينة من الابراج ولتوزيع معين لتمورات الاقلدة ، اما ترتيب الموصلات فسوف تتحكم فيه تأثيرات نسبة التداخل الراديوي مع الخطوط الاخرى . وكلما كثر عدد الموصلات في الحزمة تعاظم خطر مشاكل الاهتزاز الميكانيكي وبذلك تظهر صعوبة تصميم التباعد بين الموصلات .

وعلى المدى البعيد ربما تتغير الوضعية بصورة جذرية بظهور تطورات اخرى . ومن الممكن تطوير القابلوات الوصيلة ذات التيار المستمر (انظر الفصل 6 الفقرة 5.9 من الجزء الاول) وكذلك قابلوات التوصيل الفائق للتيار المتناوب (انظر الفقرة القادمة) في نهاية الامر بشكل كاف لتحل في الاقل محل بعض خطوط الفولتية الفائقة العلوية . وربما في المدى الأبعد قد تحل منظومات محلية صغيرة للتحويل المباشر للطاقة الحالية محل الشبكة المفردة الحالية التي تربط بين محطات التوليد الكبيرة .

9.7 القابلوات فائقة التوصيل Superconducting cables

في السنوات الاخيرة بذلت جهود علمية كبيرة ، وفي عدد من الاقطار . استهدفت تطبيق انتاج تصميم اقتصادي له صدى هندسي لقابلوات فائقة التوصيل . والهدف الرئيسي لهذا البحث هو خفض كلفة قابلوات الفولتية العالية أو الفولتية الفائقة الى درجة يكون فيها فرق الكلفة بين الخط العلوي المعلق والقابلو الارضي ضيقاً جداً بحيث يمكن استعمال هذه القابلوات في بعض المناطق والمسارات والتي هي في الوقت الحاضر تعد غير اقتصادية . واستعمال القابلوات هذه قد يكون لها شأن بالتغلب على مشاكل الحصول على طرق متروكة في مناطق مكتضة بالسكان التي تتطلبها الخطوط العلوية المعلقة وبذلك يتم تجنب مشاكل المعارضة في استغلال اراض خاصة وذات لياقة معينة في عدة مناطق من الاريساف .

في بريطانيا وقبل عدة سنين مضت تم العمل على انتاج قابلوات مبردة بالهليوم باستخدام موصلات من نوع نيوبيوم مقواة بالألمنيوم نقاوة 99.999% حيث اظهرت بعض التخمينات المشجعة من ناحية الكلفة لـ 750 ميكافولت أمبير. 33 كيلو فولت وقد تضمنت أنواع القابلوات التي أجريت عليها الاختبارات مجموعات مجوفة ذات موصلات انبوبية الشكل أو ترتيب يتضمن اربع موصلات محورية ذات عازل فراغي (Rodgers، 1967 و Edwards 1967 و Norris، Swift) واقترحت ورقتا بحث حديثتان في أمريكا (Graneau و Afshartous وآخرون 1970) ان القابلوات المطورة من قبل احدى الشركات تنافس القابلوات من النوع الأنبوبي المعزولة بالأوراق المشبعة بالزيت (انظر الفصل 5 الجزء الأول) . عند تقنيات أكثر من 1000 ميكافولت أمبير وعند فولتيات بين 138 و 345 ك . ف وقد ادعي ان الكلف الرأسمالية مقاربة لكلف القابلوات الأرضية التقليدية . وقيل أن بالأمكان لأول

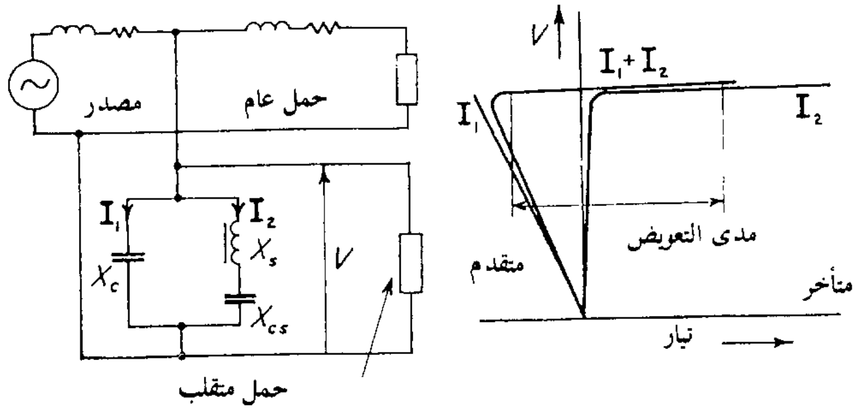
قابلومن هذه القابلوات ان يكون في الخدمة قبل 1975 . وتصميم القابلوهذا يستخدم موصلات الألمنيوم الأنبوبية المبردة داخلياً بسائل النتروجين ، وتسند برقائق مباعدة في العازل الفراغي للضغط العالي . وفي مناقشة حيوية لورقتي البحث هاتين تم طرح عدة أسئة من قبل كثير من المهندسين ، بعضهم من الشركات المنافسة التي تعمل على انتاج قابلوات سائل الهيدروجين وسائل النتروجين حيث أشير الى ان نقطة العبور للاستخدام الأقتصادي قد تكون عالية بحيث تصل الى 2500 ميكافولت أمبير ، وقد أشاروا الى عدم الواقعية في استخدام العازل الفراغي في تأسيسات القابلوات ، وقد ظهر الآن وعلى الأرجح بأن القابلوات ذات التوصيل الفائق لايمكن ان تكون بديلاً اقتصادياً بحيث تدخل الخدمة مباشرة في المستقبل القريب وربما الى ان يتم تطوير مواد لها خواص التوصيل الفائق عند درجة حرارة عالية أفضل من المواد الموجودة في الوقت الحاضر . ومع ان ذلك قد يستغرق وقتاً طويل لتصبح متيسرة لـ 500 ك . ف وأكثر . وفي حالة محولات القدرة فان مقترح التوصيلة الفائقة من غير الأرجح ان يكون وارداً الى ان يتم تطويراً جديد للموصلات الفائقة ذات الفقد الواطيء (Harrowell, 1970) .

9.8 الاحمال المتقلبة Fluctuating loads

كما جاء في الفقرة 1.5.2 من الجزء الأول التي تطرقت الى ان المعوضات التزامنية ، وافران القوس الكهربائي ومصانع درفلة الفولاذ تشتمل على احمال تتقلب كثيراً وبصورة دورية وسريعة وتزداد هذه التأثيرات سوء كلما ازدادت حجوم الوحدات الصناعية الأقتصادية ، وفي حالة افران القوس الكهربائي يكون التقلب بصفة تأرجح القدرة المتفاعلة عندما تقصر دائرة الألكترودات بوساطة شحنة المستهلكات المعدنية غير المذابة سبباً في حدوث المشاكل بصورة خاصة . وقديكون هذا التأرجح على فرن 80 ميكافولت امبير بحدود 80 MVAr . وقد يحتوي عنبار اذابة واحداً على وحدات مجموعها عدة مئات من الـ MVA . ولكنها تبرمج عموماً لكي لاتحدث التأرجحات الكبيرة في الوقت نفسه . ان افران القوس تنتج سدس انتاج الفولاذ في عموم المملكة المتحدة ، حيث قد يصل تيار القوس في الحال الحاضر الى 75 كيلو أمبير في أفران سعتها 180 طن وقد تم نصب أفران ذات 400 طن بمائة كيلو أمبير في الولايات المتحدة . عندما يسحب التيار المتقلب من قبل مثل هذه الأحمال فأنه يمر عبر ممانعة مصدر منظومة التجهيز . تظهر تقلبات مناظرة في فولتية التجهيز نتيجة لذلك . وهذه الفولتية المتقلبة (او نسبة منها)

سوف تنتقل الى جميع المستهلكين الذين يغذون من تلك الشبكة . ان الأجهزة الأكثر حساسية الى الفولتية المتقلبة هي مصابيح التنكستون والتي يمكن ان تنتج اخفاتاً ضوئياً يمكن ادراكه مع تقلب فولتية يتراوح بين 0·1 % و 0·2 % ج . م . ت . ومن أجل ان لاتسبب الأحمال المتقلبة الكبيرة أي اذى لبقية المستهلكين من خلال الأخفات الضوئي ، فمن الضروري ان يتم تقليل التقلب في التيار المسحوب من قبل الحمل او ربط الحمل الى منظومة التجهيز وفي نقطة ملائمة القرب من المصدر لتحديد تقلب الفولتية في نقطة الربط الى قيمة مقبولة . وفي هذا القطر (يقصد بريطانيا) بصورة عامة قد وجد ان الأختيار الأكثر اقتصادية هو اعتماد الأختيار الأخير ، لكن توجد حالات معينة ، خاصة في الخارج ، يكون من الضروري فيها تقليل تقلبات التيار المسحوب من منظومة التجهيز .

مع ان المعوضات التزامنية استخدمت وبنجاح لهذا الغرض ولعدة اعوام ، الا ان لها مساويء تتمثل في كلفة رأس المال العالي وتكاليف الصيانة وتجهيزها للتغذية الداخلة مما يثقل كاهل معدات الأقلدة في مهمات الدائرة القصيرة . ان التصاميم الحديثة للمعوضات الستاتيكية المتضمنة ملفات مفاعلة قابلة للتشبع اقترحت استخدام هذه المعوضات الحديثة لتجنب مساويء المعوضات القديمة المذكورة سلفاً ، ويبين الشكل 9·4 (أ) دائرة نموذجية لهذا الغرض . ولأجل التخلص من التوافقيات المهيمنة في تيار المغنطة للملف المفاعل القابل للتشبع X_s . يتألف هذا الملف من ملفين اوثلاثة ملفات مفاعلة معوضة مضاعفة ثلاثية للتردد ومربوطة على التوازي ومتوحدة مع متسعات توالٍ وتوازٍ X_{cs} ، X_c لتعطي خواص فولتية / تيار المبينة في الشكل 9.4 (ب) .



(أ) (ب)

الشكل 9.4 (أ) دائرة معوض نموذجية
(ب) خواص المعوض

من الملاحظ ان اية زيادة في الحمل ، تنعكس انخفاضاً في الفولتية عند أطراف المعوض ، حيث تؤدي الى ان يصبح تيار المعوض سعياً أكثر والذي يحاول تصحيح الفولتية . واستجابة المعوض الى تغيرات فولتية المنظومة يمكن عملها لتتم خلال دورة واحدة من تردد المصدر تقريباً بحيث تكون ملائمة للعمل مع احمال فرن القوس الكهربائي الذي تقع تأثيرات مشاكلة الرئيسية بين 2 و 10 هرتز . لقد تم حديثاً نصب وتشغيل عدة تأسيسات تجارية لهذا الغرض والبقية سوف تتبع .

المراجع

الأستقرارية العابرة

Transient stability

BIRCH, F. H. Discussion on results of full scale stability tests on the British 132 kV grid system. *Proc. I.E.E.*, Part A, August 1958, p. 372.

HARLEY, R. G. 1970. Stability of synchronous machine with divided-rotor winding. *Proc. I.E.E.*, **117**, 933–947.

NAYLOR, J. H. Developments in transmission protection methods and equipment. *Electrical Times*, 21st August 1970, pp. 263–265.

RAMA MURTHI, M., WILLIAMS, D. & HOGG, B. W. 1970. Stability of synchronous machines with 2-axis excitation systems. *Proc. I.E.E.*, **117**, 1799–1807.

RAMARAO, N. & REITAN, D. K. 1970. Improvement of power system transient stability using optimal control (bang bang control). *I.E.E.E. Trans.*, **PAS-89**, 975–984.

SOPER, J. A. Divided winding rotor aids large set leading p.f. operation. *Electrical Times*, 17th April 1969, pp. 55–62.

SOPER, J. A. & FAGG, A. R. 1969. Divided-winding-rotor Synchronous Generator. *Proc. I.E.E.*, **116**, 113–126.

SOPER, J. A. *et al.* 1970. Dual axis excitation and control of synchronous turbo-generators. *International Conference on Large High-Tension Electric Systems.* Paper 11–01 (C.I.G.R.E.).

حالات المنظومة في الأحمال العالية والواطئة :

System conditions at high and low loads

BIRCH, F. H. & STALEWSKI, A. Costs of Supplying or Absorbing MVAr. *Electrical Times*, 10th October 1963, pp. 527–531.

HALL, J. H. & SHACKSHAFT, G. Developments in the Stability Characteristics of the Power System of England and Wales. Report 32–05, 1970, *International Conference on Large High-Tension Electric Systems* (C.I.G.R.E.)

SHACKSHAFT, G. Absorbing supergrid MVAr by transformer tap staggering. *Electrical Times*, 24th July 1969, p. 50.

Design criteria and equipment for transmission at 400 kV and higher voltages. *I.E.E. Conference Publication* No. 15, 1965.

تطبيقات الحاسبة في منظومات القدرة

Computer applications in power systems

BELCH, R., ALEXANDER, C. E. & WINCH, K. Computer control at Fawley. *Electronics and Power*. May 1969, pp. 152–155.

BREWER, C. *et al.* 1968. Performance of a predictive automatic load-despatching system. *Proc. I.E.E.*, **115**, 1577–1586.

FARMER, E. D., JAMES, K. W., MORAN, F. & PETTIT, P. 1969. Development of automatic digital control of a power system from the laboratory to a field installation. *Proc. I.E.E.*, **116**, 436–444.

PULSFORD, H. E. & GUNNING, P. F. 1967. Developments in power systems control. *Proc. I.E.E.*, **114**, 1139–1148 and 1717–1720.

PRAGNELL, K. N. & CORY, B. J. 1970. Security assessment in distribution systems. *Proc. I.E.E.*, **117**, 161–164.

SHEN, C. M. & LAUGHTON, M. A. 1970. Determination of optimum power system operating conditions under constraints. *Proc. I.E.E.*, **116**, 225–239.

SNELSON, J. K. & CARSON, M. J. 1970. Logical design of branched l.v. distributors. *Proc. I.E.E.*, **117**, 415–420.

Applying computers to power system operation. *Electrical Times*, 25th June 1970, p. 63.

Automatic operation of power stations. *Electrical Times*, 6th February 1964, p. 208.

Power system control—computers in command. *Electrical Times*, 10th September 1970, p. 89.

Load prediction **تنبؤ الحمل**

CUÉNOD, M., KNIGHT, U. G. *et al.* 1970. Present trends in automatic power system security assessment and control. Report 32–12, *International Conference on Large High-Tension Electric Systems* (C.I.G.R.E.).

FARMER, E. D. & POTTON, M. J. 1968. Development of on-line load-prediction techniques with results from trials in the south-west region of the C.E.G.B. *Proc. I.E.E.*, **115**, 1549–1558.

MATTHEWMAN, P. D. & NICHOLSON, H. 1968. Techniques for load prediction in the electricity supply industry. *Proc. I.E.E.*, **115**, 1451–1457.

TOYODA, J., CHEN, M. S. & INOUE, Y. 1970. An application of state estimation to short-term load forecasting, Part I: forecasting modelling. *I.E.E.E. Trans.* Power Apparatus and Systems PAS-89, 1678–1682. Part II: implementation. ibid. 1683–1686.

E.H.V. A.C. transmission **نقل التيار المتناوب بالفولتيات الفائقة :**

ALEKSANDROV, G. N., REDKOV, V. P., GORIN, B. N., STEKOLNIKOV, I. S. & SHKILYOV, A. V. 1970. Peculiarities of spark discharge in long air gaps of high-voltage structures. *Proceedings of the International Conference on Gas Discharges* (I.E.E., London, 1970). Conference Publication No. 70, 309–312.

HILEMAN, A. R., LEBLANC, P. R. & BROWN, G. W. 1970. Estimating the switching-surge performance of transmission lines. *Trans. I.E.E.E.*, Power Apparatus and Systems, PAS-89, 1455–1465.

NICHOLLS, W. J. The future of overhead lines. *Electrical Times*, pp. 2–6, 1st October 1970.

I.E.E.E. COMMITTEE REPORT: *Switching Surges*, **Part I**: Phase to ground voltages, A.I.E.E. Trans. PAS-80, 240–261, 1961. **Part II**: Selection of typical waves for insulation co-ordination, *Trans. I.E.E.E.*, PAS-85, 1091–1097, 1966. **Part III**: Field and analyzer results for transmission lines, past, present and future trends, *Trans. I.E.E.E.*, PAS-89, 173–189, 1970.

System reliability for the 1970's. *Electrical World*, 23rd June 1969.

Superconducting cables **القابلوات فائقة التوصيل**

AFSHARTOUS, S. B., GRANEAU, P. & JEANMONOD, J. 1970. Economic assessment of a liquid-nitrogen cooled cable. *I.E.E.E. Trans.*, Power Systems and Apparatus, PAS-89, 8–16.

GRANEAU, P. 1970. Economics of underground transmission with cryogenic cables. *I.E.E.E. Trans.*, Power Systems and Apparatus, PAS-89, 1–7.

HARROWELL, R. V. 1970. Feasibility of a power transformer with superconducting windings. *Proc. I.E.E.*, **117**, 131–140.

NORRIS, W. T. & SWIFT, D. A. Developments augur design of superconducting cables. *Electrical World*, pp. 50–54, 24th July 1967.

ROGERS, E. C. & EDWARDS, D.R. Design for a 750 MVA superconducting power cable. *Electrical Review*, pp. 2–5, 8th September 1967.

Fluctuating loads **تقلب الأحمال**

KENDALL, P.G. 1966. Light flicker in relation t wer-system voltage fluctuation. *Proc. I.E.E.*, **113**, 471–479.

FRIEDLANDER, E. 1966. Static network stabilization. *G.E.C. Journal*, **33**, No. 2, 58–61.

المراجع العامة :

General References

BROWN, S. 1968. The fascination of electrical power engineering. *Proc. I.E.E.*, **115,** 1–6.

E.H.V. Transmission Line Reference Book. Edison Electric Institute, New York, 1968.

FRANKEL, A. 1970. Large turbine generators: survey of progress. *Proc. I.E.E.*, **117,** 799–810.

HUMPAGE, W. D. & SAHA, T. N. 1967. Digital-computer methods in dynamic-response analysis of turbogenerator units. *Proc. I.E.E.*, **114,** 1115–30.

Progress in overhead lines and cables for 220 *kV and above*. I.E.E. Conference publication No. 44, 1968.

RAWCLIFFE, G. H. 1970. Research, education and the heavy electrical industry. *Proc. I.E.E.*, **117,** 961–967.

RIPPON, E. C. 1968. Power plant for the 1970s. *Proc. I.E.E.*, **115,** 103–112.

SAYERS, D. P. 1969. Twenty years of electricity distribution under public control. *Proc. I.E.E.*, **116,** 1527–1543.

هذه الصفحة تركت خالية

This page is left blank

الملحق م . 1

جبر المصفوفات MATRIX ALGEBRA

م . 1.1 مقدمة

يهدف هذا الملحق الى اعطاء نبذة مختصرة لبعض خواص المصفوفات التي لها علاقة بفصول هذا الكتاب ولمعلومات أكثر تفصيلاً عن هذا الموضوع يشار بمراجعة بعض الكتب المصدرية مثل كتاب لويس وبرايس (Lewis and Pryce 1966) أو كتاب تروبر(Tropper 1962).

تعرف المصفوفة بأنها حشد منظم لصفوف من الاعداد (حقيقية أو مركبة) والتي تفيد في تمثيل وتعريف أو معالجة العلاقات بين عدد من المعادلات الخطية الآنية (وقد تكون كثيرة جداً) . مثال على ذلك المعادلات [8.14] قد يتم تمثيلها كالآتي

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots\cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots\cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots\cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \qquad [1.1.\text{م}]$$

او بصورة متضامة (مدمّجة) اكثر [I] = [Y][V] . في هذه الحالة تكون مصفوفة معاملات Y مربعة ، أي أنها تحتوي n من الأسطر و n من الاعمدة ، وقد تختلف أعداد الاسطر والاعمدة في أمثلة أخرى من المصفوفات . أما المصفوفات [I] و [V] اللتان لهما عمود واحد فقط فتعرف كل منهما بالمصفوفة العمودية أو المصفوفة المتجهة . وليس هناك قيمة للمصفوفة ولكنها ترتيب لعدد من الاعداد سواء أكانت حقيقة أم مركبة مثل ماذكر في Y_{11} و Y_{12} .. الخ . والتي تعرف بالعناصر ، واذا تغير ترتيب هذه العناصر فعندئذ تأخذ المصفوفة صيغة أخرى . ان العناصر التي تكون على الخط الافقي تشكل سطراً وتلك التي على الخط العمودي تشكل عموداً . وقد يعرف العنصر Y_{32} بالرمز السفلي الثنائي بحيث يكون في السطر الثالث والعمود الثاني .

م 1.2 جمع أو طرح المصفوفات

Addition or subtraction of matrices

اذا كان هناك مصفوفتان لهما المرتبة نفسها وهذه تعني كونهما يمتلكان العدد نفسه من الاسطر والعدد نفسه من الاعمدة ، فمن الممكن تشكيل مجموعهما اوالفرق بينهما وذلك باضافة او طرح عناصرهما المتناظرة . لذلك اذا كانت

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad [\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} e & f \\ g & h \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{A}] \pm [\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} (a \pm e) & (b \pm f) \\ (c \pm g) & (d \pm h) \end{bmatrix} \qquad [1.2.م]$$

في بعض الأحيان من الضروري ان يلاحظ انه توجد بعض الاسطر والأعمدة المفقودة (كما في المثال الوارد في الفقرة 8.2.1) وفي هذا الحالة يجب ان تعد عناصرها المفقودة جميعاً أصفاراً .

م.1.3 ضرب المصفوفة برقم حقيقي أو مركب

ان هذه تعرف في بعض الاحيان بالضرب بكمية عددية (لا متجهة) لتفريقها عن الضرب بمصفوفة اخرى . فاذا ضربت اي مصفوفة بكمية عددية k سواء كانت الكمية حقيقية او مركبة ، فان كل عنصر في المصفوفة يضرب في هذه الكمية (k).
لذا فاذا عرفنا المصفوفة [A] كما في اعلاه فان

$$k[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} ka & kb \\ kc & kd \end{bmatrix} \qquad [1.3.م]$$

م.1.4 ضرب المصفوفات (مصفوفتين أو أكثر) :

لايمكن ضرب مصفوفة باخرى الا اذا كان عدد أعمدة المصفوفة الاولى (الواقعة على جهة اليسار) مساوياً لعدد أسطر الثانية . واذا كانت المصفوفتان المراد ضربهما معاً هما [A] التي هي $m \times n$ (اي لها m من الاسطر و n من الاعمدة) و[B] التي هي

$n\times p$ ، فان حاصل الضرب [B] [A] هو مصفوفة لها m من الاسطر و p من الاعمدة . ان ترتيب الضرب يكون في هذه الحالة مهماً اي ان $[A][B]\neq[B][A]$ بصورة عامة .

ان النقطة الأخيرة يمكن توضيحها وذلك بضرب سطر متجه بعمود متجه وعلى سبيـــل المثـــــال :

$$[a_{11}\quad a_{12}\quad a_{13}]\begin{bmatrix}b_{11}\\b_{21}\\b_{31}\end{bmatrix}=(a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21}+a_{13}b_{31}) \qquad [م.1.4]$$

والنتيجة تكون كمية عددية (حقيقة اومركبة) يتم الحصول عليها بضرب العنصر الاول للسطر 1 من المصفوفة الاولى بالعنصر الاول للعمود 1 من المصفوفة الثانية ، ثم يتم جمع حواصل الضرب المناظرة للعناصر الثانية التي تكون في الاسطر والاعمدة نفسها وجمع حواصل الضرب المناظرة ايضاً للعناصر الثالثة وهكذا . وعلى الجانب الآخر فان نتيجة ضرب عمود متجه بسطر متجه تكون

$$\begin{bmatrix}b_{11}\\b_{21}\\b_{31}\end{bmatrix}[a_{11}\quad a_{12}\quad a_{13}]=\begin{bmatrix}b_{11}a_{11} & b_{11}a_{12} & b_{11}a_{13}\\b_{21}a_{11} & b_{21}a_{12} & b_{21}a_{13}\\b_{31}a_{11} & b_{31}a_{12} & b_{31}a_{13}\end{bmatrix} \qquad [م.1.5]$$

وهذه هـي مصفوفة مربعة لها العدد نفسه من الاسطر والاعمدة مثل عدد الاعمدة والاسطر المتجهة الاصلية على التوالـي (والامثلة المذكورة في الفقرة 8.6 تعطـي امثلة لهذا الضرب) . من الممكن التبين أن موضع اي عنصر في حاصل الضرب يتحدد بعدد الاسطر الذي يكون فيها الحد الاول لضرب الـكميات اللامتجهة موضوعـــاً في بداية المصفوفات المراد ضربها سوية مع عدد الاعمدة في المصفوفة الثانية التـــي تكون موضوعاً فيها القسم الثاني لحاصل ضرب الكمية العددية . وتوضيح آخر لهذا هو ضرب مصفوفة 3×2 مع مصفوفة 2×3 وكما يلي :

$$[C]=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12}\\a_{21} & a_{22}\\a_{31} & a_{32}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}b_{11} & b_{12} & b_{13}\\b_{21} & b_{22} & b_{23}\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}(a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21}) & (a_{11}b_{12}+a_{12}b_{22}) & (a_{11}b_{13}+a_{12}b_{23})\\(a_{21}b_{11}+a_{22}b_{21}) & (a_{21}b_{12}+a_{22}b_{22}) & (a_{21}b_{13}+a_{22}b_{23})\\(a_{31}b_{11}+a_{32}b_{21}) & (a_{31}b_{12}+a_{32}b_{22}) & (a_{31}b_{13}+a_{32}b_{23})\end{bmatrix} \qquad [م.1.6]$$

بصورة عامة فان اي عنصر c_{jk} لحاصل الضرب [B] [A] للمصفوفتين يكون ضرباً عددياً للسطر في المصفوفة [A] والعمود k في المصفوفة [B] . بحيث يعطى العنصر c_{jk} كالاتـي

$$c_{jk} = a_{j1}b_{1k} + a_{j2}b_{2k} + a_{j3}b_{3k} + \ldots a_{jn}b_{nk}$$

الرموز السفلية لأي عنصر في حاصل الضرب [C] تكون الاولى وتكـون أيضـاً الرموز السفلية الاخيرة في العنصر ab ، فمثلاً . $c_{32} = (a_{31}b_{12} + a_{32}b_{22})$

ولان القانون الابدالـي لايطبق عموماً لجميع المصفوفات يجب التفريق بين حالة ما قبل الضرب وما بعدها . اي ان

$$[A][B] \neq [B][A] \qquad [\text{م } 1.7]$$

اما قانون التجميع فيمكن تطبيقه بحيث ان

$$([A][B])[C] = [A]([B][C]) \qquad [\text{م } 1.8]$$

وكذلك يطبق قانون التوزيع حيث يكون

$$[C]([A]+[B]) = [C][A]+[C][B] \qquad [\text{م } 1.9]$$

م 1.5 منقولة مصفوفة **Transpose of a matrix**

اذا تم ابدال اسطر مصفوفة ما باعمدتها وبالعكس ، اي بجعل السطر 1 العمود 1 والعمود 1 يصبح السطر 1 وهلم جراً فان المصفوفة الجديدة تسمـى بمنقولة الأولـى وتختلف هذه بصورة عامة عن الاصلية ، فمثلاً

اذا كان

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix}$$

فان المنقولة $[A]_t$ تكون

$$[A]_t = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \end{bmatrix} \qquad [\text{م } 1.10]$$

م 1.5.1 منقولة حاصل ضرب مصفوفتين

ان منقولة حاصل ضرب مصفوفتين تكون حاصل ضرب منقولة كل مصفوفة على حدة مع بعضها ولكن بعكس المرتبة أي

$$([A][B])_t = [B]_t[A]_t \qquad [\,\text{م } 1.11\,]$$

م 1.5.2 منقولة المصفوفات المجزأة

اذا تم تجزئة المصفوفة [A] بين الاسطر وكما موضح بالخط الأفقي المتصل

$$[A] = \left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \hline a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} A' \\ \hline A'' \end{array}\right] \qquad [\,\text{م } 1.12\,]$$

لذا

$$[A]_t = \left[\begin{array}{ccc|cc} a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} & a_{51} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{42} & a_{52} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{43} & a_{53} \\ \hdashline a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} & a_{54} \end{array}\right] = [A'_t \mid A''_t] \qquad [\,\text{م} .1.13\,]$$

بالاسلوب نفسه اذا تم تجزئتها بين الاعمدة بخط مقطع عمودي في [م 1.12] بحيث ان

$$[A] = [A''' \vdots A''''] \qquad [\,\text{م } \cdot 1.14\,]$$

فان

$$[A]_t = \left[\begin{array}{c} A'''_t \\ \hdashline A''''_t \end{array}\right] \qquad [\,\text{م } \cdot 1.15\,]$$

واذا جزئت المصفوفة [A] الى اربعة اجزاء ، اي باستخدام الخطوط المقطعة والمتصلة كليهما في الوقت نفسه في [م . 1.12] بحيث ان

$$[A] = \begin{bmatrix} B & C \\ D & E \end{bmatrix}$$

لذا

$$[A]_t = \begin{bmatrix} B_t & D_t \\ C_t & E_t \end{bmatrix} \qquad [\text{م} \cdot 1.16]$$

وتوضح العلاقة [م . 1.13] الحالات [م 1.15] و [م 1.16] ولقيمة معينـــة للمنظومة [A] المعطاة في المعادلة [م 1.12] .

م 1.6 المصفوفة القطرية Diagonal matrix

المصفوفة القطرية هـي مصفوفة مربعة تكون فيها جميع العناصر صفراً عدا تلك التـي تقع في قطرها الرئيســي (من الزاوية اليسرى العلوية الى الزاوية اليمنـــى السفلية) وبعض هذه المصفوفات وليس أغلبها قد تحتوي حدوداً قيمتها صفر ضمن قطرها الرئيسي (واذا كانت الحدوذ صفراً فسوف تكون صفرية)

1.7 المصفوفة الاحادية Unit matrix

ان المصفوفة الاحادية هـي حالة خاصة من المصفوفة القطرية عندما تكون جميع قيم الحدود الواقعة على القطر الرئيســي احادية القيمة (تساوي 1) وتكون جميع الحدود اللاقطرية صفراً . ويطلق عليها المصفوفة احادية ذات المرتبة n عندما تكون مصفوفـة $n \times n$ وتكون المصفوفة الاحادية ذات المرتبة 3

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [\text{م} \cdot 1.17]$$

ويشار هنا للمصفوفة الاحادية بـ [U] بدلاً من الرمز المعهود [I] وذلك لتجنب الخلط بينها وبين مصفوفة تيار العقدة . لـذا فلأية مصفـوفـة مربعـة [A] يكون .

$$[U][A] = [A][U] = [A] \qquad [\text{م} \cdot 1.18]$$

م 1.8 مقلوب (أو معكوس) المصفوفة

Inverse (or reciprocal) of a matrix

اذا اريد ايجاد فولتيات العقد لتيارات عقد معلومة من معادلة تيار العقد ([8.20]) وهي [I] = [Y] [V] . فان هذا لايمكن فعله بقسمة [I] على [Y] ذلك لان قسمة المصفوفات على بعضها ليست ممكنة حيث ان المصفوفة نفسها لا تمتلك آية قيمة . لكن اذا تم ضرب طرفي المعادلة [8.20] بمصفوفة بحيث يكون حاصل ضربها مع [Y] مصفوفة احادية فيمكن ايجاد [V] . وهذه المصفوفة هي $[Y]^{-1}$ وتكون مقلوب او معكوس [Y] بحيث ان

$$[Y]^{-1}[I] = [Y]^{-1}[Y][V] = [U][V] = [V] \qquad [\text{م } 1.19]$$

مما يجب ملاحظته هو ان $[Y]^{-1}[Y] = [Y][Y]^{-1} = [U]$ لمصفوفة مربعة غير انفرادية (وهي تلك المصفوفة التي قيمة محددها لاتساوي صفرا) واذا كانت $[A] = [B]^{-1}$ فان $[A]^{-1} = [B]$.(يجب ان يلاحظ ان المصفوفات السطرية والعمودية (المتجهة) تكون انفرادية) .

م 1.8.1 معكوس حاصل ضرب عدد من المصفوفات

اذا كان [A] و [B] مصفوفتين مربعتين غير انفراديتين فان

$$([A][B])([B]^{-1}[A]^{-1}) = [A][U][A]^{-1} = [U]$$

بحيث انه من تعريف المعكوس يجب ان يكون [B] [A] معكوساً لـ $[B]^{-1}[A]^{-1}$.
وهذه النتيجة يمكن ان تشمل حاصل ضرب اي عدد من المصفوفات . وقد تصاغ كلامياً بان معكوس حاصل ضرب اي عدد من المصفوفات المربعة غير الانفرادية يكون مساوياً لحاصل ضرب معكوس كل منها في معكوس الاخر ولكن باخذ الترتيب العكسي اي ان

$$([A][B][C])^{-1} = [C]^{-1}[B]^{-1}[A]^{-1} \qquad [\text{م } 1.20]$$

م 1.9 عكس المصفوفة Matrix inversion

من الممكن ايجاد معكوس مصفوفة $[Y]^{-1}$ لمصفوفة مربعة غير انفرادية [Y] . ولأجل ان تكون مصفوفة معينة غير انفرادية يجب ان لايكون محددها $|Y|$ صفراً . عليه فاذا كانت [Y] مصفوفة غير انفرادية لها العناصر التالية

$$[Y] = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$$

عندئذ يكون محددها $|Y|$ له القيمة التاليـة

$$|Y| = (aei - afh + bfg - bdi + cdh - ceg) \neq 0 \qquad [\text{م } 1.21]$$

ولكي نجد معكوس المصفوفة باليد (بدون اللجوء الى الطرق المتعددة الاخرى المتيسرة وذلك لتقليل الوقت والخزن في الآلات الحاسبة ، راجع الفقرة 5 من الفصل 8) ، يجب اتباع الخطوات التالية التي وضحت للمصفوفة [Y] ذات 3×3 المعطاة أعلاه لغرض التبسيط .

(1) – ايجاد منقولة المصفوفة [Y] (اي بابدال الاسطر بالأعمدة وبالعكس)وهي

$$[Y]_t = \begin{bmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{bmatrix} \qquad [\text{م } 1.22]$$

(2) – يبدل كل عنصر في $[Y]_t$ بعامله القرين (او المقصور ذي الاشارة) .والمقصور لأي عنصر هو المحدد الذي يتم الحصول عليه بحذف السطر او العمود الحاوي على العنصر المذكور (وهذا المحدد يكون بمرتبة أقل من رتبة $(|Y|)$) .أما اشارة العنصر Y_{mn} فتعطى بوساطة $(-1)^{(m+n)}$ (وهو العنصر في السطر m والعمود n) . في الحالة الخاصة للمعادلة [م . 1.22] يكون الحد الاول للسطر 1 للعامل القرين موجباً : والحد الاول للسطر 2 سالباً وهكذا وتكون العوامل القرينة $[Y]_t$

$$\begin{matrix} +\begin{vmatrix} e & h \\ f & i \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} b & h \\ c & i \end{vmatrix} & +\begin{vmatrix} b & e \\ c & f \end{vmatrix} \\ -\begin{vmatrix} d & g \\ f & i \end{vmatrix} & +\begin{vmatrix} a & g \\ c & i \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} a & d \\ c & f \end{vmatrix} \\ +\begin{vmatrix} d & g \\ e & h \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} a & g \\ b & h \end{vmatrix} & +\begin{vmatrix} a & d \\ b & e \end{vmatrix} \end{matrix}$$

والمصفوفة الجديدة الناشئة عن ابدال كل عنصر لـ« $[Y]_t$ » بعامله القرين تسمى بقرينـــة المصفوفـــة [Y] .

(3) – يتم الحصول على معكوس [Y] عندئذ بقسمة المصفوفة القرينة على المحدد $|Y|$

$$[Y]^{-1} = \frac{1}{|Y|}\begin{bmatrix} (ei-hf) & (hc-bi) & (bf-ec) \\ (gf-di) & (ai-gc) & (dc-af) \\ (dh-ge) & (gb-ah) & (ae-db) \end{bmatrix} \quad [\text{م}.1.23]$$

م 1.9.1 المصفوفة المتعامدة Orthogonal matrix

اذا ساوى معكوس مصفوفة او معكوس قرينتها الى منقولة المصفوفة نفسها يقال عن هذه المصفوفة انها متعامدة . على هذا الاساس تكون [T] مصفوفة متعامدة اذا كان

$$[T]^{-1} = [T]_t$$

او

$$[T]^{-1} = [T^*]_t$$

ومثال على مصفوفة تحويل متعامدة هو مصفوفة التحويل المتماثلة $1/\sqrt{3}[T_s]$ كما تمت مناقشتها في الفقرة 7.5 والفقرة 7.6 .

م 1.10 القيم الذاتية لمصفوفة Eigenvalues of a matrix

ان المعادلات

$$\left.\begin{aligned} a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3 &= \lambda x_1 \\ a_{21}x_1+a_{22}x_2+a_{23}x_3 &= \lambda x_2 \\ a_{31}x_1+a_{32}x_2+a_{33}x_3 &= \lambda x_3 \end{aligned}\right\} \quad [\text{م}.1.24]$$

حيث λ هي قيمة لااتجاهية (اي عدد اعتيادي قد يكون حقيقياً او مركباً) من الممكن كتابتها بصيغة المصفوفة كما يـــلي

$$[A][X] = \lambda[X] \qquad [\text{م}.1.25]$$

واذ كان [X] متجهاً بأبعاد ثلاثة فان المتجه $\lambda[X]$ هو متجه باتجاه [X] نفسه . بصورة عامة يكون [A] مصفوفة مربعة ذات $n\times n$ ويكون [X] عموداً متجهاً ذا

مرتبة n عالية . أما قيم λ التي تحقق [م. 1.25] فمن الممكن ايجادها باعادة هذه المعادلـة كالآتـي

$$[\mathbf{A}-\lambda\mathbf{U}][\mathbf{X}] = 0 \qquad [\text{م. } 1.26]$$

حيث ان [U] مصفوفة احادية ذات مرتبة n (الملحق م. 1.7) . فاذا كانت $[\mathbf{B}] = [\mathbf{A}-\lambda\mathbf{U}]$ واذا كان من الممكن ان يكون $|B| \neq 0$ فان $[\mathbf{B}]^{-1}$ سوف تكون موجودة وسوف يصبح حاصل ضرب [م. 1.26] في $[\mathbf{B}]^{-1}$ كما يـلي

$$[\mathbf{B}]^{-1}[\mathbf{B}][\mathbf{X}] = 0 \qquad [\text{م. } 1.27]$$

بما ان $[\mathbf{U}] = [\mathbf{B}]^{-1}[\mathbf{B}]$. فان [م. 1.27] تعطي حلا جميع متغيراته صفرية (تافهاً) فقط وهو $[\mathbf{X}] = 0$ اذا كانت $|B| \neq 0$. وفي الجانب الآخر اذا كانت $|B| = 0$ وكان $n = 1$. تصبح عندئذ المعادلة [م. 1.26] بصيغة $b_{11}x_1 = 0$ مع كون $|B| = b_{11} = 0$ وهذا ليس حلا صفري المتغيرات وعلى هذا الاساس فانه لحل لاصفـري المتغيـرات

$$|A-\lambda U| = 0 \qquad [\text{م. } 1.28]$$

وبفك [م. 1.28] تعطي

$$\begin{vmatrix} (a_{11}-\lambda) & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & (a_{22}-\lambda) & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & (a_{33}-\lambda) \end{vmatrix} = 0 \qquad [\text{م. } 1.29]$$

والمعادلة [م. 1.29] هي معادلة من الدرجة n (مكعبة في هذه الحالة) في λ ، وتدعى بالمعادلة المميزة للمصفوفة [A] . وتسمى جذورها القيم الذاتية (او تسمى الجذور المميزة أو غير المستترة) . وللحالة الحاضرة حيث $n = 3$ ووجود ثلاث قيم ذاتية ، فقد تكون هذه الجذور مختلفة وقد يتساوى منها اثنان او ثلاثتها ولكن اذا كانت [A] مصفوفة غير انفرادية فسوف لايكون احد هذه الجذور مساوياً للصفر . وقد تكون القيم الذاتية اعداداً حقيقية او مركبة .

المراجـع

Lewis, W. E. & Pryce, D. G. 1965. *The Application of Matrix Theory to Electrical Engineering*. Spon, London.

Tropper, A. M. 1962. *Matrix Theory for Electrical Engineering Students*, Harrap, London.

الملحق م.2

النظريات الاقتصادية في توليد القدرة الكهربائية

ECONOMICS OF ELECTRICAL POWER GENERATION

م 2.1. مقدمة

سوف يتطرق هذا الملحق الى التشغيل الاقتصادي لمنظومة القدرة الوطنية في المملكة المتحدة والمنفذة بشكل جيد . في هذا المضمار يقصد بالاقتصاد ان المنظومة مضى على تشغيلها سنين عديدة (عقود متعددة من السنين) بحيث ان المعلومات أو البيانات الاحصائية المستفيضة الموجودة عنها تشيروتبين الاخطاء الحاصلة بين التخمينات المستقبلية السابقة وماحدث لاحقا بالفعل بخصوص الطلب على القدرة الاعظم والاستهلاك في الطاقة وعامل الحمل المتوقع . ويقصد بعامل الحمل لحمل متغير هو النسبة بين معدل القدرة والقدرة العظمى خلال فترة زمنية معينة . وتؤخذ عادة لسنة واحدة .

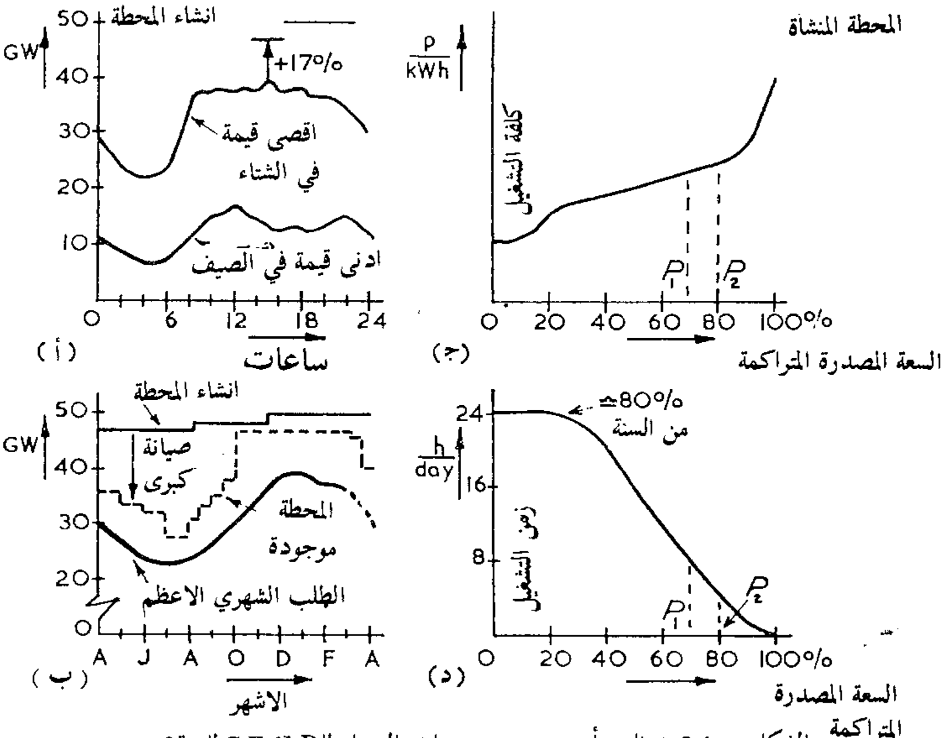
وفي مقاطعتي انكلترا وويلزتتم السيطرة على التوليد والنقل من قبل هيئة توليد الكهرباء المركزية (C.E.G.B.) التي تقوم بتجهيز الطاقة الى اثنتي عشرة منطقة تديرها مجالس (هيئات ثانوية) تقوم بتوزيع الطاقة الى المستهلكين . وهذه المجالس وكذلك المجالس المشابهة في سكوتلندة تكون مسؤولة تجاه الهيئة العليا للكهرباء وهذه بدورها تدار من قبل وزير التجارة والصناعة البريطاني . ان بعض البيانات المبينة في هذا الملحق مستخلصة من التقارير السنوية للـ C.E.G.B. المرفوعة الى الوزير للسنة المنتهية في 31 آذار (مارت) 1970 .

م 2.2 التخمينات المتقدمة لنمو الاحمال المستقبلية

Forward estimates of future load growth

لما كان بناء محطة توليد قدرة يستغرق حوالي 6 سنوات (وقد تأخذ الموافقات الاصولية لبنائها بعضا من هذا الوقت) فان خطوط النقل الكبرى يستغرق بناؤها حوالي 4 سنوات وكذلك يستغرق التوزيع بحدود سنتين . لذا فانه من الامور الاساسية التكهن بنمو الحمل لعدة سنوات الى الامام . حيث تعمل التخمينات المسبقة لعشرين سنة الى الامام وتصحح

كل خمس سنين ، وتجرى التخمينات النهائية حوالي سبع سنين للامام وتصحح كل سنة . وتكون هذه التخمينات قاعدة متوسطة تستخدم في وزن المعلومات الواردة من المصادر الحكومية (في ضوء الخطط الاقتصادية الوطنية) ومن هيئات المناطق (في ضوء التغير في احمال المستهلكين) ، وطرق تخمين الاحمال المتوقعة بطريقة مد منحنيات الحمل بصورة خطية (طريقة الاستكمال) والمبنية على اساس البيانات المغطية لعدة سنين سابقة وكذلك تأثير منافسة الصيغ الاخرى للقدرة الكهربائية مثل الغاز الطبيعي لبحر الشمال . ويتم عمل التخمينات للطلب الاعظم للقدرة ، حيث يؤثر هذا على مقدار سعة الانشاء (التقنين) لمشروع معين وذلك ليلبي الطلب أو الحاجة (ذلك لان الطاقة الكهربائية



الشكل 2.1. تمثل (أ) و (ب) منحنيات الحمل للC.E.G.B للسنة1960 - 1970
(في (ب) انشاء وتشغيل المشروع هو تقريبي)
(ج) منحنى نموذجي لمرتبة الخواص (مرتبة الجدارة)
(د) منحنى نموذجي لاوقات التشغيل

لايمكن خزنها مباشرة) وكذلك استهلاك الطاقة حيث تؤثر هذه على المتطلبات السنوية للوقود . ولاتجرى التخمينات على اساس المجموع الوطني الكلي فحسب ولكن ايضاً في ضوء كل منطقة وكذلك في ضوء انواع خاصة من المستهلكين – الصناعيين . التجارين

والاستهلاك المنزلي . وكذلك تجرى التخمينات لايام نموذجية من الفصول الاربعة للسنة . ويوضح الشكل م 2.1 (أ) و(ب) منحنيات طلب نموذجية بهذا الخصوص . ولما كان الطلب الاعظم معتمداً على قساوة الطقس في الشتاء ، فان تخمين الطلب الاعظم هذا بوساطة المقارنة السنوية يكون بالاساس على معدل حالة فترة البرد نفسها .

عندما يتم تخمين الطلب الاعظم لمعدل فترة البرد ،فانه يجري تخمين وجودية المشروع في أوقات الطلب الاعظم . وبالاضافة الى تخمين انهيار المشروع ، يعطى سماح لامكانية وقوع شتاء قاسي وكذلك انشاء محطات مستقبلية جديدة وكلا هذين الاحتمالين يبنى على اساس الخبرة بصورة رئيسية . ان الفرق بين سعة الانشاء الضرورية والطلب الاعظم المخمن يشار اليه بالاحتياطي الفاصل للمشروع (حد المشروع) ، ويؤخذ هذا الاحتياطي في الوقت الحاضر 17% من الطلب الاعظم المخمن لست سنوات قادمة . حيث يكون 11% من هذا الرقم سماحاً لانهيار المشروع بينما الباقي هو سماح احصائي لذلك الطلب المعرض الى تجاوز السعة المتيسرة الى حد انه لشتاء واحد سيعاني بعض من المستهلكين (وعددهم 4) من هبوط بالفولتية أو التردد أوكلاهما ، وكذلك لثلاثة مواسم شتائية سيعاني 100 من بعض المستهلكين من انقطاع تجهيز الطاقة اليهم . ان حد المشروع المختار هذا هو حل وسط بين أنفاق رأس المال المفرط على مشروع جديد وخطر الفوضى الصناعية الناجمة عن الفشل المتكرر الكثير في مواجهة الطلب الاعظم .

وبمرور الوقت ، اذا ظهر ان التخمينات على خطأ بكمية ملحوظة ، تتيسر بعض الطرق لتقليل هذا الخطأ . وللعجز المحتمل في المشروع يمكن بناء مولدات توربينية غازية من النوع المستخدم في مكائن الطائرات في مدة ثلاث سنوات حيث تمتلك هذه المولدات في الوقت الحاضر تقنياً أقصى مقداره 70 ميكا واط . ان هذه الطواقم من المولدات لها كلفة تصنيع واطئة ولكن كلفة تشغيلها عالية . لذلك فهي تستخدم بصورة رئيسية في اوقات الطلب الأعظم : وهي غالباً مايشار اليها بمحطات الذروة (peaky plant) . ويمكن تعجيل برنامج الأستهلاك بسبب الفائض المحتمل في المشروع . ولكن نظراً لأن محطة مستهلكة قد تحتاج الى ان تبدل بوساطة تقوية منظومة النقل المحلية فيعطى ذلك فترة زمنية قدرها سنتان في الأقل . وفي الحالات الحقيقية ، قد يتم الحصول على القدرة من سكوتلندة أو من فرنسا (وكذلك من بقية اوربا الغربية) عن طريق قابلو التيار المستمر العابر للبحار ذي سعة 120/160 ميكا واط بشرط وجود السعة الفائضة لدى هؤلاء .

ان اهمية التخمينات المتقدمة يمكن الحكم عليها من الشكل م . 2.1 (أ) والذي يبين منحنى الطلب على مدار يوم واحد حدثت فيه ذروة (أعظم) طلب خلال سنة 1969 - 1970 . ومع ان ذروة الطلب تحدث لفترة قصيرة من الزمن ، فان المشروع المنفذ (والمخطط له لست سنوات مسبقة) يجب ان يكون من الكفاية بحيث يعطي

وجودية مشروع أكبر من ذروة الطلب . ان الطلب على الطاقة الكهربائية والذي ازداد حوالي 8% سنوياً في معظم فترة الستينات (1960 — 1970) قد ارتفع خلال بضع سنين بحوالي 4% فقط . حتى أنه نقص عن هذا المقدار بصورة وقتية في بعض الأحيان . ومرحلة اولى . وبسبب الأنهيار الكبير غير الطبيعي للمشروع . فقد تمت مجابهة ذروة طلب تقدر بـ 38·1 جيكا واط (GW) ولكن بعد انقاص حمل مقداره 1·5 GW وذلك بتقليل فولتية بعض المستهلكين . قد يتم خلال التشغيل الأضطراري تقليل فولتية بعض المستهلكين الى الحد الأدنى المسموح به وهو 6% تحت الفولتية الأسمية وبذلك يتم تقليل الطلب على القدرة بـ 6 % - 8 % في حالة تطبيق هذا التقليل على جميع المستهلكين . وقد يقلل تردد المنظومة أيضاً الى الحد الأدنى المسموح به وهو 1% تحت التردد الأسمي . بذلك يقلل الطلب على القدرة بحوالي 1% ايضاً .

لقد تم الحصول على عامل حمل منظومة سنوي مقداره 54·7% مبني على أساس الطلب الأعظم . وهذا يزداد ببطء كل سنة مشيراً الى ان ازدياد استهلاك الطاقة يكون أسرع من الطلب على القدرة في مبيعات الطاقة في فترات خارج الذروة . واذا كان بالأمكان الأيفاء باحتياج الطلب الأعظم فبالأمكان ايضا الايفاء بالاستهلاك السنوي بشرط وجود الوقود الضروري وتيسر الوقت لصيانة المشروع وتجديده .

وفي المحطات الحديثة المزودة بمضخات تغذية تعمل بالتدوير البخاري يتم استغلال حوالي 3·5% من القدرة المتولدة لتغذية ملحقات المحطة ذاتها . وترتفع هذه النسبة الى مابين 5·3 و 7 بالمئة في المحطات التي تدار ملحقاتها كليا بالطاقة الكهربائية . اما الباقي وهوخرج المحطة . فيشار له بكونه المصدر (المخرج) sent-out ويرمز له بـ GW s.o. لذا ففي تاريخ 31 اذار 1970 . كانت السعة الكلية لمحطات الـ C.E.G.B. المنفذة حوالي 50·1 GW وكانت السعة المخرجة 46·9 GW s.o. وكان الموجود في اليوم الذي يحدث فيه الطلب الاعظم 81·3% من السعة المخرجة . اي 38·1 GW .

م 2.3 اساسيات الاقتصاد Economic principles

ان انفاق المنظومة الـكلي السنوي لمنظومة هيئة توليد الطاقة المركزية C.E.G.B. يتألف مما يلي :

(أ) انفاق رأس المال (35) = الربح (17)+الاندثار (18)
(ب) كلفة أعمال التشغيل والتوليد (59) = الوقود (المجهز) (44) + التشغيل والأدامة (15)
(جـ) النقل (1)
(د) الاخرى (الادارة . التعليم . البحوث) (5) .

وتبين الأرقام المقدمة اعلاه جزء من النسبة المئوية حيث ان 0·531 = 100% بنس / كيلوات ساعة p/kW المبيعة للسنة 1969 / 1970 .

وتدفع كلفة رأس المال للمشروع الجديد (بدفعات مجزاة في الاقل) وذلـــك بالاستدانة من هيئة الطاقة الـكهربائية Electricity Council ثم من الحكومة ذاتها . اما الاندثار فيدفع على مدى عدد من السنين ويشار اليه بانه المدة الاقتصادية للمشروع بحيث ان الاندثار الـكلي المدفوع يسترد القرض الاصلي . وقد تطرق الـكاتب نورس Norris الى الطرق المختلفة لعمل سماح للاندثار وقد اعطى لهذا الموضوع قوانين رياضية . وتتلخص ابسط طريقة وهي طريقة الموارد المالية الغاطسة sinking fund والتي بها يجمع كل من الربح والاندثار على انها مدفوعات ثابتة سنوية يعبر عنها عادة بنسبة مئوية من القرض الاصلي . ان المورد المالي يتراكم مع الـــربح الى ان تنتهي المـــدة الاقتصادية حيث يسترد بعدها القرض الاصلي ذاته . ومما تجدر الاشارة اليه هو ان المدة الاقتصادية تكون اقل من مدة التشغيل العملية بفاصل زمني امين . ويجب ان تدفع تكاليف رأس المال بغض النظر عن اشتغال المشروع أو عدم اشتغاله .

ان التكاليف المشار اليها سلفاً تدفع من ايرادات بيع الطاقة الكهربائية واي فائض في هذه الايرادات يستغل بوصفه دعما ماليا ذاتيا . اي يقلل من كمية القرض الجديد للمشاريع المستقبلية .

وباتباع اسلوب التعريفة الاعتيادية ذات الشقين . فان الشق الاول يمثل حصة كل مستهلك من راس المال السنوي . وكذلك التكاليف الثابتة الاخرى والتي تبنى اساسا . للمستهلكين الصناعين . على الطلب الاعظم للمستهلك . بينما يكون الشق الثاني عبارة

عن حصة المستهلك من كلفة التشغيل وتعتمد هذه على الوحدة الاستهلاكية له . من الواضح انه من غير المعقول ان يلزم المستهلك بدفع كلفة راس المال للمحطة الجديدة في السنة التي يتم التعاقد على بنائها . فلهذا مع أن طريقة الاندثار السنوي تكون كيفية الى حد ما ، الا أنها توزع مدفوعات رأس المال على عدد من السنين التي يعدها المحاسبون أماناً ، اي انه ليس من المرجح ان تصبح المحطة ملغية ضمن فترتها الاقتصادية بسبب التطور التقني .

اما اقل بيانات اقتصادية عامة فتكون كالاتي

	الفحم	الزيت (4)	توربيات غازية مساعدة AGT (3)	(1)	الطاقة النووية (2)
كلفة راس المال ، باوند/ كيلواط	55	50	35	100	70
الفترة الاقتصادية ، بالسنين	30	30	25	20	25
كلفة التشغيل ، بنس / كيلواط ساعة					
الوقود	0·16	0·16	0·56	0·042	0·05
راس المال (5)	0·083	0·075		0·19	0·14
المجموع (6)	0·25	0·24		0·24	0·22

تشير الارقام (1) ، (2) ، (3) ، (4) ، (5) ، (6) الى مايلي

(1) الجيل الاول (العلامة I) لمشروع ماغنوكس + magnox في (1970)

(2) الجيل الثاني (العلامة II) المفاعلات ذات التبريد الغازي المتطورة (AGR) (1970-1975)

(3) التوربينات الغازية المساعدة . كلفة الوقود تشمل صيانة الماكنة بعد كل 2000 ساعة من التشغيل . وعامل الحمل هنا يكون عادةً واطئاً جداً .

(4) يشمل ضريبة وقود الزيت : وبدون الضريبة تصبح كلفة الوقود 0·108

(5) بيانات نموذجية . الربح 8% . عامل الحمل السنوي 75% (وتعتمد التكاليف بصورة كبيرة عليهما معاً).

(6) الاندثار بسبب تكاليف تشغيل المحطة .

+ مشروع ماغنوكس : مشروع لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية في انكلترا

م 2.4 التشغيل الاقتصادي لمشروع توليد

Economic operation of generating plant

ان الكفاءة الاقتصادية لطقم توليد يمكن ان تعطى على أنها منحنى يربط بين كلفة معدل الطاقة الداخلة على هيئة وقود (بنس / ساعة) وقيمة أساس لمعدل الطاقة الخارجة أو القدرة الخارجة P . وبفرض الصيغة الرباعية ، فان معدل الكلفة الداخلة يساوي $(a+bP+cP^2)$ حيث يكون a معدل الكلفة الداخلة في حالة اللاحمل . ولاية قيمة لـ P معطاة ، فان الكلفة الجزئية للوقود هي التصاعد المناظر للرسم وتكون لها صيغة خطية وهي $(b+2cP)$ بنس / كيلواط ساعة . فاذا ازداد خرج الطقم بكمية صغيرة خلال زمن معلوم من P الى $P+\Delta P$ ، فان متوسط كلفة الوقود الجزئية تكون النسبة بين الكلفة الاضافية والطاقة الاضافية الخارجة بالكيلواط ساعة . بالاسلوب نفسه فان النقص الجزئي في التكاليف يشير الى النقصان في الطاقة الخارجة . والمعادلات الرياضية التي تمثل هذه العلاقات اعطيت في كتاب تيلروباول Taylor and Boal الصفحة 60.

واذا امتلك طاقمان نقصاً جزئياً مختلفاً في تكاليف الوقود وكانا يقتسمان حملاً ما ، فان كلفة التشغيل الاجمالية يمكن ان تقلل وذلك بنقل حمل من الطقم الذي له زيادة جزئية عالية في تكاليف الوقود الى الطقم الآخر . وهذا الاسلوب يقلل الزيادة الجزئية في تكاليف الوقود للطقم الأول ويزيد من تلك التي للطقم الاخر . ويتم الوصول الى الغاية عندما تتساوى الزيادة الجزئية في تكاليف الوقود لكلا الطاقمين ، وتكون كلفة التشغيل الكلية أقل مايمكن . اذاكان منحنى معدل كلفة دخل الوقود الى القدرة الخارجة قد افترض خطياً (ويسمى بخط ويلانز Willan's line) ، وتكون الزيادة المتدرجة في كلفة الوقود « b » ثابتة.في هذه الحالة يتم الحصول على تشغيل اقتصادي عندما يؤخذ الحمل الأساس – وهو الحمل المقابل للتحميل خلال فترة الليل الأدنى (الشكل م . 2.1 (أ)) – بوساطة الطقم الذي له أوطأ معدل كلفة . أما الطواقم الغالية فيتم تحميلها بالترتيب حسب تزايد معدل كلفتها كلما ازداد الحمل . ويشار الى هذه العملية بالتحميل حسب ترتيب الجدارة . وتمتلك الطواقم الحديثة كفاءة حرارية قصوى حوالي 35% عند الحمل المقنن وتشتغل عند الحمل المقنن لها على انها محطات حمل – أساس . أما الطواقم القديمة فتكون كفاءتها الحرارية القصوى حوالي 80% في الحمل المقنن وتعمل عند هذه القيمة من الحمل (ان امكن ذلك اعتماداً على الطلب الكلي) . ويمكن عد مدى الحمل ما بين

80 و 100٪ من الحمل الكلي تجاوزاً للحمل المقنن ويلزم التشغيل ضمن هذا المدى كلفة أعلى من معدل كلفة الوقود .

ان تشغيل منطقة السيطرة على الشبكة الكبرى التابعة لهيئة توليد الطاقة المركزية C.E.G.B. لتحقيق كلفة التشغيل دنيا تكون على اساس مرتبة الجدارة . عمليا ، تتضمن كلفة التشغيل السماحات المعطاة الى القدرة الاضافية التي يأخذها الطاقم وكذلك مفاقيد النقل . ولما كانت كلفة رأس المال السنوية لمشروع منفذ وموجود ثابتة وغير معتمدة على التشغيل فانها لاتؤثر على ترتيب الجدارة المذكور . ويبين الشكل م. 2.1 (ج) مخططا هستوغرامياً سلساً وبسيطاً لكلفة تشغيل كل طقم من الطواقم مقدرة بالبنس لكل كيلواط ساعة p/kWh ومبنية على أساس التقنين الخارج المتراكم ، مرتبة حسب تزايد مرتبة الكلفة . ولطلب كلي معين مقداره P_1 . فان الطواقم التي تكون على يسار P_1 سوف تكون (بالتقريب)محملة كلياً . اما الفرق بين التقنين المصدر الكلي للطواقم المشتغلة والطلب الكلي الحقيقي فيسمى الاحتياطي الدوار . ويجب ان يكون لكل منطقة من مناطق السيطرة لهيئة توليد الطاقة المركزية احتياطي دوار كبير بحيث يكفي لتعويض الخسارة المفاجئة لاكبر طقم توليد في تلك المنطقة . اما طواقم الحمل الاساس ذات ترتيب الجدارة العالي (الكلفة الواطئة) فتشتغل على اساس ثلاث وجبات بحيث يكون أشتغال الطواقم ذات الكلفة المتوسطة على وجبتين وتشتغل الطواقم ذات ترتيب الجدارة الواطيء على وجبة واحدة وتحمل هذه الطواقم خلال فترات الطلب الأعظم فقط ويوضح الشكل م. 2.1 (د) معدل فترات تشغيل نموذجية مبنية على اساس تقنين الميكاواط المصدرة المتراكمة . ويميل ترتيب جدارة طقم معين الى الهبوط بمرور الزمن : ومثال على ذلك اذا أحيل طقم ما من التشغيل بثلاث وجبات الى وجبتين تبديليتين . فان كلفة تشغيله تزداد بسبب تكاليف بدء التشغيل والايقاف الاضافية . ويتطلب تحميل ترتيب الجدارة منظومة نقل ذات 400 ك.ف قادرة على حمل انتقال القدرة الضرورية ولهذا فهي محددة بأي نقص أو تعطيل في منظومة النقل ذاتها .

وبالاشارة مرة أخرى الى الشكل م. 2.1 (ج) فان معدل كلفة التشغيل بالبنس / كيلوواط ساعة تكون مساوية لـ

$$\frac{\text{كلفة التشغيل الاجمالية لجميع المحطات}}{\text{الكيلوواط ساعة الكلية الخارجة}}$$

مأخوذة على فترة زمنية معينة . خذ مثلا على ذلك لسنة واحدة . واذا كان الطلب P_1 وليكن متزايدا . فان كلفة التشغيل الجزئية المتزايدة هي عبارةعن كلفة التشغيل للطقم الآخر الذي هوبصدد التحميل بترتيب الجدارة . ولما كانت كلفة التشغيل الجزئية المتزايدة اكبر من معدل الكلفة . فان أية زيادة في الحمل سوف تزيد من معدل كلفة التوليد .

ان كلفة مشروع جديدا معبرا عنها بالباوند / كيلواط للسعة المصدرة . تنخفض كلما ازدادت السعة . لذلك فان طواقم التيار في سنة 1971 كانت مقننة عند 500 و 660 وكذلك 1300 ميكاواط . 3000 دورة بالدقيقة . وقد وضعت في الخدمة الطواقم ذات محاور التدوير المفردة وذلك في المرحلة الثانية للتطوير . ان اضافة الوحدات ذات السعة العالية وكلفة التشغيل الواطئة تسبب في جعل كثير من المحطات الصغيرة في المراحل الدنيا في جدول ترتيب الجدارة مما أدى الى خفض عامل قدرتها وازدياد كلفة تشغيلها . وهذا يعد أقل احباطا من تشغيل محطة جديدة بكلفة واطئة حيث ان صافي الادخار في التشغيل يمكن ان يحبط اجمالي مصروفات رأس المال السنوية لمحطة توليد نووية من نوع A.G.R. تقريبا . وهو ايضا يساوي بالتقريب نصف كلفة محطة حرارية مثل محطة باري (Berrie) وبالعكس فاذا تعطلت محطة جديدة وخاصة اذا كانت محطة نووية فقد تزداد الكلفة الاجمالية للتشغيل بخطورة .

ان ماتم التطرق اليه سلفا يرتبط بالتقليل الادني لكلفة تشغيل منطقة سيطرة على الشبكة الكبرى . وبعض المناطق مثل مدلاند وجنوب يوركشاير لهاكلفة تشغيل واطئة وهي تصدر القدرة الى المناطق ذات الكلفة العالية . ويتم تنظيم انتقال القدرة مابين المناطق بمستوى معين بحيث ان الكلفة الجزئية المتزايدة لمنطقة التصدير تساوي كلفة الانخفاض الجزئية للمنطقة المستوردة وذلك بسبب السماحات المعمولة لمفاقيد النقل وتقنين منظومة النقل ذاتها . ان انتقال القدرة دوليا مابين انكلترا . سكوتلاندا وفرنسا تكون محكومة (بصورة مثالية) بالقواعد الاقتصادية نفسها . ويتم اقسام محصلة الادخار في تكاليف التشغيل بالتساوي بين قطرين اثنين . اما الادخارات الكبيرة الناجمة

محطة باري : وهي توليد طاقة كهربائية في انكلترا

عن تطبيق طريقة التكاليف الجزئية المتزايدة لكل طقم في منظومة هيئة توليد الطاقة المركزية C.E.G.B. فقد تكون صغيرة نسبة الى كلفة برامج الحاسبة الالكترونية ، لذلك فان هذه الطريقة محدودة في الوقت الحاضر في مناطق الشبكة الكبرى وانتقال القدرة فيما بينها . وفي الاقطار الواسعة مثل الولايات المتحدة الامريكية تربك مفاقيد النقل حساب معاملات فقد النقل (ويمكن الأطلاع على خلاصة لهذا الموضوع والتي قام بها كرشماير Kirchmayer وزملائه في كتاب ستيفنس Stevenson لسنة 1962) .

م ـ 2.5 اختيار الوقود Choice of fuel

يمكن تحديد اختيار الوقود بوساطة سياسة الدولة ، ومثال على ذلك فان الفحم غير المرغوب فيه يجب ان يستخدم عندما يكون هناك فائض في الفحم او لزوم تخفيض أستهلاك النفط المستورد عندما يؤثر هذا على وضع ميزان المدفوعات الوطني . وخلافاً لذلك فان اختيار الوقود يعتمد على أساس اعتبارات اقتصادية ، ويعبر عن هذه عادة بانها كلفة الحرارة المجهزة (بنس /كيلواط ساعة) أو ، بشمول كفاءة التحويل ، يعبر عنها بانها كلفة الطاقة الكهربائية المخرجة (بنس /كيلواط – مصدرة) .

ان الفحم هو الوقود الاساس المستخدم في المملكة المتحدة . والفحم المستخرج من المناجم الالية يكون ملائماً . لمحطات التوليد ولكن هناك تناقص متنام لتدرج الانواع الرخيصة للفحم : حيث تكون كلفة الفحم الجيد حوالي 50% اكثر من النوع الرخيص . ومعظم الإنواع الرخيصة من الفحم تستخرج من المناجم الموجودة في مدلاند ومنطقة جنوب يوركشاير ، لذا فان معظم المحطات الكبيرة تكون موضوعة في هذه المناطق . وفي سنة 1960-1970 بلغت مرصودات الفحم من متطلبات الوقود الكلية لهيئة توليد الطاقة المركزية حوالي 77% (وزن لانتاج الحرارة نفسها) ، وحوالي 63% من الطاقة التي جهزت الى القاطرات . ان محتويات الرماد من الفحم هي حوالي 20% ، ومع ان الرماد يستخدم بكثرة لرصف الطرق . وتقوية الكونكريت ، وكذلك المكعبات السمنتية الرمادية ، الا ان مخلفاته المتنامية في الوديان ومقالع الحجارة خلال مدة التشغيل للمحطة تشكل معضلة . الفحم هو الوقود النادر المتيسر في الوقت الحاضر ، لذا فان عدداً محدوداً من المراجل قد تم تحويرها لحرق النفط أو الغاز بينما عدد قليل من هذه المراجل تكون ملائمة للاشعال المزدوج أو الخليط .

يمكن نقل الطاقة بهيئة فحم ، أوكهرباء ، والمسافة الكافية التي تكون لها كلفة النقل متساوية تعتمد على البيانات المفروضة : مثل ، الطلب ، الاستهلاك ، عامل الحمل ، الفولتية . ولمحطة تقع قرب حقل فحم ، فان التكاليف يجب ان تتضمن نقل الفحم لمسافة كيلومترات قليلة واي خطوط نقل تربط هذه المحطة بالشبكة الكبرى ، وحصة التكاليف لاي من خطوط الشبكة الكبرى الموجودة المستخدمة وكذلك كلفة المفاقيد في هذه الخطوط . ولمحطات القدرة الحديثة ذات 2000 ميكاواط فان المسافة الكافية لايستساغ ان تتجاوز 30 كيلومتر تقريباً . وبما ان اغلبية مسافات النقل تتجاوز الثلاثين كيلومتراً ، فانه من الطبيعي نقل الطاقة بصيغة كهرباء . وهذا الاستنتاج يطبق لمحطات حمل أساس فقط ولكن للمحطات الجديدة لذروة الحمل (التوربينات الغازية مثلاً) فانه من الاكثر اقتصادية ان تبنى قرب الحمل .

وفي الوقت الحاضر تستخدم مخلفات النفط في بعض من المحطات الكبيرة . لذا فان عدداً محدوداً من المراجل في المحطات الموجودة قد تم تحويرها لاحراق مخلفات النفط بدلاً من الفحم ، لان استخدام النفط هو اسهل من الفحم . وتبنى محطات احتراق مخلفات البترول الكبيرة عادة قرب مصافي النفط الرئيسية ، وعلى السواحل ، حيث يتم فصل مخلفات النفط الثقيلة من الاجزاء الاخف . ويستخدم النفط الخفيف (المصفى) ايضاً لطواقم التوليد ذات التوربينات الغازية والمنصوبة في محطات القدرة ، وخاصة في المناطق المستوردة للقدرة وذلك للاستفادة منها في التوليد خلال اوقات الطلب الاعظم وكذلك لتجهيز القدرة لملحقات المحطة الحديثة . ان طواقم التوربينات — الغازية تكون محكمة الصنع وهي ملائمة لاغراض السيطرة الذاتية عن بعد . وقد تستخدم هذه الطواقم لاعادة تطوير مناطق بعض محطات القدرة القديمة .

ويستخدم الغاز ، الذي يماثل غاز بحر الشمال (الطبيعي) ، شأنه شأن النفط ، في بعض المراجل المحورة في المحطات الموجودة . ان الغاز من السهل التعامل معه ولكن الكميات المتيسرة منه لتوليد الطاقة الكهربائية حالياً محدودة .

وارخص انواع الوقود المتيسرة هو الوقود النووي ، وكذلك فان تكاليف نقل الوقود هي ايضاً منخفضة جداً . ومعظم كلفة الوقود الكلية تكون بسبب تصنيع الوقود في اوعية ثم حشوه في المفاعل . ومن الوجهة الحسابية فهي استرداد للنواتج المتفاعلة من الوقود المشع . ان الجيل الاول او مفاعلات ماغنوكس كان قد تم التعاقد عليها في اواخر الستينات . اما الجيل الثاني أو المفاعلات المتطورة المبردة بالغاز (A.G.R.) فقد تم التعاقد عليها في

الوقت الحاضر . اما مفاعلات الجيل الثالث فقد تكون من نوع الحرارة العالية المبردة بالغاز باستخدام الهليوم الخامل والبخار على أنها أوساط انتقال حرارة ابتدائية وثانوية . وقد يكون من الممكن ادارة التوربينات الغازية مباشرة بدون دورة البخار . وهنالك تطوير تحت الانجاز في سنة 1972 وهو المفاعل 250 ميكاواط المبرد بالمعادن السائلة سريعة الانسياب المعمول منه نموذج في منطقة ديونري في شمال سكوتلندة .

ويتم توليد معظم القدرة الكهرومائية في سكوتلندا وويلز. ولكنها تمثل نسبة مئوية قليلة فقط من القدرة الكهربائية الكلية المتولدة وهي من اكثر المشاريع الاقتصادية التي تم انشاؤها في الوقت الحاضر . ان الطواقم الكهرومائية تشبه طواقم التوربين الغازي من حيث انه بالامكان تشغيلها وايقافها بسرعة (بالنسبة الى طواقم التوربينات البخارية) وهي ملائمة جداً للسيطرة الذاتية عن بعد . وتكون الطاقة المتولدة منها معتمدة على هطول الامطار المتغيرة وعلى حجم المساحات التي تجمع السيول والخزانات . وتعتمد القدرة العظمى المتولدة على تقنين الطواقم ذاتها .

ان مشاريع ضخ المخزون هي مشاريع كهرومائية متعاكسة وكذلك فهي طريقة غير مباشرة لخزن الطاقة الكهربائية حيث بالاضافة الى خزانات طبيعية ذات المنسوب العالي يتطلب مشروع ضخ المخزون خزاناً ذا منسوب واطيء بحيث يمكن عكس اتجاه سريان الماء وضخه بطريقة معكوسة الى الخزان ذي المنسوب العالي . ويمكن تقليل تكاليف الهندسة المدنية اذا كان احد الخزانين موجوداً في حالة طبيعية أوكلاهما . وعندما يكون الطلب على الحمل واطئاً فان مشروع ضخ المخزون يتم تشغيله بالقيام بالضخ ، وبذلك فانّ الكلفة لكل كيلواط ساعة المستخدمة تكون الكلفة الجزئية المتزايدة للمحطة الاخرى ذات ترتيب الجدارة العالي التي يتم تحميلها بسبت الطلب الاضافي على الحمل زائداً كلفة النقل . ويتم تشغيل المشروع عندما يكون الطلب كبيراً . وتكون كفاءة الدورة الأجمالية حوالي 75٪ بحيث تكون كلفة اعادة التوليد مساوية لكلفة الدخل مقسومة على 0·75 واذا كانت هذه الكلفة اقل من الكلفة الجزئية المنخفضة لمحطة مشتغلة ذات ترتيب جدارة منخفض ، كان اعادة التوليد اقتصادياً . ويعتمد المشروع على كمية الماء المخزونة التي تكون متيسرة للتشغيل الملائم . وتحدد كمية الماءالموجودة في الخزان العلوي الكيلواط الكلية المتولدة وهذه تعتمد على طلب المنظومة والذي يكون واطئاً لفترة طويلة بحيث يبرر ضخ تجهيز الماء الضروري بصورة كافية . وعلى المدار اليومي او الأسبوعي يجب أن تقلل الكلفة الاجمالية الى الحد الادنى . ان مشاريع ضخ المخزون تكون مساعدات مفيدة

للتوليد النووي . وفي الغالب يمكن التبين أن نصب محطات نووية كثيرة يكون اقتصادياً اكثر من الايفاء بمتطلبات الحمل الاساس . اما الفائض فيتم استخدامه لضخ الماء خلال فترة الليل . وبعدها يستخدم هذا الماء لتوليد الطاقة الكهربائية خلال فترة ذروة الحمل لليوم التالي .

المراجع

AKHTAR, M. Y. 1969. New approach for economic load scheduling. *Proc. I.E.E.* **116**, 533–538.

BERRIE, T. W. 1967. The economics of system planning in bulk electricity supply. *Elec. Rev.*, 15th, 22nd, 29th, September.

CENTRAL ELECTRICITY GENERATING BOARD, Annual report. HMSO.

DALE, L. C. L. *et al.* 1968. Gas-turbine plant for peak-load generation and synchronous compensation. *Proc. I.E.E.* **115**, 969–979.

FANSHEL, S. & LYNES, E. S. 1964. Economic power generation using linear programming. *I.E.E.E.*, PAS-83, 347–356.

MITCHELL, J. M. *et al.* 1969. Steam plant for the 1970s. *Elec. Times*, **155**, 61–63.

NORRIS, T. E. 1970. Economic comparisons in planning for electricity supply. *Proc. I.E.E.* **117**, 593–605.

PIPE, E. J. 1969. Power station cost-trends underline nuclear claims. *Elec. Times*, **156**, 57–58.

STEVENSON, W. D. 1962. *Elements of Power System Analysis.* McGraw-Hill, New York.

TAYLOR, E. O. & BOAL, G. A. (Eds.) 1969. *Power System Economics*, Arnold.

WELLS, D. W. 1968. Method for economic secure loading of a power system. *Proc. I.E.E.* **115**, 1190–1194.

المصطلحات العلمية
(انكليزي – عربـــي)

المصطلح بالانكليـزي	المصطلح بالعربيـة
Absorption	امتصاص
Abrasion	تآكل ، حك
Accelerating relay	مرحل معجل (مسارع)
Active	فعال
Adjustment	تعيير ، ضبط
Admittance	مسامحة ، مسايرة
Air – blast	دفع هواء ، عصف هواء
Air – core	قلب (لب) هوائي
Air circuit breaker	قاطع دورة هوائي
Air gap	فجوة هوائية
Air insulation	عزل هوائي
Alarm – circuit	دائرة تنبيه
Alive	مكهرب
Allowable load	حمل مسموح
Alternator	منوب ، مولد متزامن
Ampere – turn	أمبير – لفة
Amplifier	مضخم
Amplitude	اتساع
Amplitude modulation	تضمين اتساعي
Analogue Computer	حاسبة تناظرية
Angular	زاوي
Annealed	ملطف ، ملدن
Anode	مصعد ، أنود
Aperiodic	لادوري
Apparatus	جهاز
Apparent power	قدرة ظاهرية

Arc	قوس شرارة
Arc discharge	تفريغ قوسي
Arbitrary	كيفي ، اعتباطي
Arc resistance	مقاومة القوس
Armature	منتج ، عضوالانتاج
Armature reaction	رد فعل المنتج
Armour	مسلح ، مدرع
Asymmetrical	غيرمتماثل
Asynchronous	لامتزامن
Attenuation	تضاؤل ، توهين
Attraction	جذب ، تجاذب
Automatic	ذاتي ، طوعي ، تلقائي
Automatic reclosure	اعادة الغلق الذاتي (الغالق الذاتي)
Automatic voltage regulator	منظم الفولتية الذاتي
Auto - transformer	محول ذاتي
Auxiliary	مساعد
Auxiliary contacts	ملامسات مساعدة
Availability	توفرية ، وجود
Average value	قيمة متوسطة
Axis	محور
Back ward wave	موجة خلفية
Balance	متزن . متوازن
Balanced current protection	منظومة حماية تيارات متزنة
Balancer	موازن
Band	حزمة . نطاق
Band pass filter	مرشح امرار نطاقي
Band width	عرض النطاق . عرض الحزمة
Bank	خازن
Bar winding	ملف قضيبي
Base	قاعدة . أساس

Base load	الحمل الاساس
Base voltage	الفولتية الاساس
Bias	انحياز
Bias voltage	فولتية انحياز
Bilateral	ثنائي الاتجاه ، ذو اتجاهين
Binomial	ذو حدين
Bistable	ثنائي استقرار
Block diagram	رسم تخطيطي
Blocking	كبح تشغيل ، تثبيت . تقييد
Booster	معزز
Branch	فرع
Break down	انهيار
Burden	عبء ، حمل
Bus - bar	قضيب توزيع
Bundle	حزمة
Bundle conductor	موصل حزمي
Buckling	احديداب
Bushing	جلبة عازلة
Butt - gaps	فجوات متناكبة (متقاربة مع بعضها)
Cable	قابلو
Cable box	صندوق قابلو
Calibration	تعيير
Capacitance	سعة
Capacitive reactance	مفاعلة سعوية
Capacitor	متسعة
Capital cost	كلفة رأس المال
Carrier wave	موجة حاملة
Cascade	تعاقبـي
Catenary	منحنى سلسلي
Cathode	كاثود (مهبط)

Center tap	مأخذ مركزي (وسطي)
Characteristic	خاصية (مميز)
Charging current	تيار الشحن
Choke coil	ملف خانق
Chorded	موتر
Circulating current	تيار دوار
Circuit breaker	قاطع دورة
Clear	أزال ، أجلى
Clearance	حيز الخلوص
Close coupling	تقارن محكم (دقيق)
Co - axial	متحد المحور (محوري)
Common	مشترك ، عام
Commutator	مبدل ، معدل
Commutative (commutation)	تبادلي (تبديل)
Compensation	تعويض
Complex	مركب
Component	مركبة
Commulative	متراكم
Concentric	متحد المركز
Conditions	ظروف
Conductance	مواصلة
Conductor	موصل
Configuration	هيئة ، شكل عام
Co – factor	العامل القرين
Conjucate	مرافق
Constraints	مقيدات
Contact	ملامس ، تماس
Contact points	نقاط تلامس ، ملامسات
Control circuit	دائرة سيطرة
Consumer	مستهلك

Converter	جهاز تحويل
Convergence	تقارب
Core	قلب ، لب
Core – less	عديم القلب
Core–type transformer	محول بقلب حديد
Corona	هالة
Coronal discharge	تفريغ هالي
Cosmic rays	اشعاعات كونية
Counter current breaking	الكبح بتيار معكوس
Coupled	مقترن
Coupling	تقارن
Crest	قمة (ذروة)
Critical	حرج
Cross – arm	ذراع مستعرض
Cross – bound	ترابط عرضي
Cross channel	عابر البحار (القناة)
Current transformer	محول تيار
Cut – off	قطع
Cycle	دورة ، مدار
Damped	مخمد ، متضائل
Damper windings	ملفات مخمدة
Dash pot	وعاء توهين (كبح)
Data	بيانات (معلومات)
Datum	مرجع اسناد
Dead load	حمل خامل (غير مكهرب)
Decay	تضاؤل ، تلاشي ، تناقص
Decomposition	انحلال
Decrement	نقصان
Demodulation	ازالة التضمين

Demotion	احاله
Detection	كشف
Determinant	محدد
Device	جهاز ، وسيلة
Dielectric strength	متانة (شدة) العازل
Differential protection	حماية فرقية
Diode	ثنائي
Direct axis reactance	مفاعلة المحور المباشر
Directional	أتجاهي
Discrete	منفصل
Discharge	تفريغ
Divertor	مفرع
Domain	حيز ، مجال ، حقل
Double circuit	دائرة ثنائية
Double – winding	ذو ملفين
Driving voltage	الفولتية المؤثرة
Droop	هابطة ، منخفضة
Dual	ثنائي ، مزدوج
Dummy	كاذب ، وهمي
Dynamic load	حمل ديناميكي
Dynamic stability	استقرارية ديناميكية
Duration	أمد ، فترة بقاء
Earthing	تأريض
Earth Fault	عطل ارضي
Earthing reactor	ملف مفاعل أرضي
Eign value	قيمة ذاتية
Electro motive force (e.m.f)	قوة دافعة كهربائية (ق . د. ك)
Element	عنصر ، جزء ضئيل
Enthalpy	المحتوى الحراري
Equal area criterion	قاعدة المساحة المتساوية

Equipment	معدات
Equipotential	متساوي الجهد
Estimation	تقدير ، تثمين ـ تخمين
Excessive	مفرط ، زائد
Excitation	اثارة
Exciter	مثير ، جهاز الأثارة
Expenditure	انفاق
Exponential	أسـي
Factor	عامل
Fault clearance	ازالة العطل
Falut - level	مستوى العطل
Fault location	موقع (مكان) العطل
Feedback	تغذية خلفية
Feeder	مغذ
Ferromagnetic	مادة عالية النفاذية المغناطيسية
Ferrule	حلقة ـ طرف حديد
Filter	مرشـح
Flash over	شرر عرضـي
Fluctuation	تقلب ـ تراوح
Flux	فيض
Forecast	تكهف
Form	صيغة ـ هيئة ـ شكل ـ نمط
Frequency	تردد
Frequency changer	مغير التردد
Fuse	مصهر
Galvanised	مغلفن
Gap	فجوة ـ ثغرة
Geometric mean distance	متوسط البعد الهندسي (م. ب. هـ)
Geometric mean radius	متوسط نصف القطر الهندسي (م . نق . هـ)
Generator	مولد
Governor	متحكم

Graphical method	طريقة تخطيطية
Grid	شبكة كبرى
Grid in – feed	تغذية الشبكات الداخلة
Ground	أرضي
Grounded	مؤرض
High voltage	فولتية عالية
Histogram	رسم هستكوغرافي
Holding coil	ملف ضبط (أستمرار)
Hot rolled steel	فولاذ حار الدرفلة
Hunting	تشطط
Hydro – electric	كهرومائي
Hysteresis	تخلف مغناطيسي
Imaginary	خيالي
Impedance	ممانعة
Impregnation	تشرب
Impulse	دفعة
Incoming	وارد – داخل – قادم
Inductive reactance	مفاعلة حثية
Inductor	ملف محاثة ، محاث
Infeed	تغذية داخلة
Inherent	متلازم ، ملازم . متأصل
Inherent voltage regulation	انتظام الفولتية المتلازم
In – phase	منطبق الطور (متحد الطور)
Inrush	اندفاعي
Instantaneous	لحظي
Interconnected	مترابطة
Interconnector	رابط بيني
Interlock	تواشج
Internal fault	عطل داخلي
Interphase	بين الأطوار .
Interpoles	الأقطاب البينة
Interruption	قصم . كسر . قطع

Intertrip	أفلات (اسقاط) بيني
Interval	فترة
Invariant power	قدرة لامتغيرة
Inverse time lag	تأخير زمني عكسي
Inverter	مقوم عكسي
Itterative solution	حل تكراري
Junction	نقطة اتصال ، ملتقى
Jagged	متعرج ، مثلم ، مسنن
Lag	متأخر ، متخلف
Lamination	رقيقـــة
Lumped	متضام ، مكتّل
Lapped	متراكب ، متداخل
Layout	مخطط
Lead	متقدم
Leakage	تسرب
Level	مستوى
Lightning	صاعقة
Limit	حد ، حافة
Link	وصيل ، تشابك ، ترابط
Links	وصيلات
Limb	فرع
Linear	خطي
Line voltage	فولتية الخط (خط – خط)
Load	حمل
Load flow	سريان الحمل
Loan	قرض
Lock – out	مسك – امساك

Loop	دارة
Loss	فقد
Magneto motive force(m.m.f)	قوة دافعة مغناطيسية (ق. د . مغ)
Making current	تيار الوصل
Manipulate	أجراء يدوي . تعريف . معالجة
Margin	حد . مقدار الفرق . أحتياطي . فاصل
Matching	توفيق . موافقة . موائمة
Maximum	أقصى . أعظم
Mean value	متوسط القيمة
Merit - order	ترتيب الجدارة
Mertz - price protection system	منظومة ميرتز برايز للحماية
Mesh	شبكة
Minimum	أدنى
Mod ification	تحوير (تغيير)
Motor	محرك
Mutual	تبادلي
Negative sequence	تتابع سالب
Network	شبكة عاملة
Neutral	محايد
N odal	عقدي
N ode	عقدة
N ominal	أسمي
N on - directional	لااتجاهي
N on - linear	لاخطي
Non - unit	لاوحدية
Notation	ترميز — رمز
Nozzel	نافث
Off - Line	خارج الخط
On - Line	على الخط
Offset	أحباط
Oil conser vator	حافظة الزيت

Open – circuit	دائرة مفتوحة
Operating quantity.	كمية (مقدار) التشغيل
Operator	عامل (مدّور)
Optimum	أمثل ، أفضل
Orthogonal	متعامد
Oscillator	مذبذب
Oscillatory	متذبذب
Oscillogram	رسم تذبذبي
Oscillograph	راسم الذبذبات
Outgoing	خارج – صادر
Out let	منفذ ، مخرج
Out put	خرج ، أخراج ، خارج
Over – excitation	اثارة مفرطة
Over head line	خط نقل علوي معلق
Over lapping	تراكب ، تداخل
Over load	حمل مفرط (حمل زائد)
Over – current	تيار مفرط ، تيار زائد
Over – laod	حمل مفرط (زائد)
Over – reach	متجاوز الوصول
Over – shoot	طفرة
Over – voltage	فولتية مفرطة (زائدة)
Parameter	معلم
passive	غير فعال ، هامد
pattern	نموذج ، شكل ، نمط
peak	ذروة
Per unit	نسبة الوحدة
period	فترة
Periodic	دوري
Performance	أداء
Permeability	انفاذية

Permeance	منافذة
Permissible	مسموح به
Permittivity	تجاوزية – سماحية (العازل)
Persisting fault	عطل مستمر ، باقي
Phase	طـور
Phase angle	زاويــة طــور
Phase comparator	مقارن طــور
Phase shift	ازاحة طــور
Phasor	مطاور
Phasor diagram	مخطط طوري
Pick up current	تيار الإلتقاط (بدء التشغيل)
Pick – up value	قيمة الالتقاط
Pilot wires	أسلاك مرشدة (رائدة)
Plane	مستوي
Plastic clay	طين لدن
Polarity	قطبيــة
Pole	قطــب
Pole slipping	انزلاق القطب
Porcelain	خزف (بورسلين)
Positive sequence	تتابع موجب
Potential	جهــد
Potential gradient	تدرج الجهد
Power coefficient	معامل القدرة
Power factor	عامل القدرة
Prime mover	مدور ابتدائــي
Primary	ابتدائــي
Process	اجراء ، طريقة
Propegation	انتشار
Protection zone	منطقة حمايــة
Protective	حمائي (لأغراض الحماية)

Proximity effect	التأثير التقاربــي
Pumped – storage	ضخ المخزون
Puncture	خرق
Pure	صافي ، نقي ، بحت
Quadratic function	دالة تربيعية
Quadrature	تعامدي
Radial syastem	منظومة شعاعية
Radial transmission line	خط نقل شعاعي
Radian	درجة نقطرية (نصف قطرية)
Rated	مقنن ، مقدر
Reactance	مفاعلــة
Reactive compensation	تعويض متفاعل
Receiving	استلام ، يستلم
Recovery voltage	فولتية الاسترداد (الاستفاقة)
Rectifier	مقــوم
Reference	مرجع ، اسنــاد
Regulation	انتظام ، تنظيم
Reignition	تكرار اتقاد (اعادة اتقاد)
Relay	مرحــل
Relaying point	نقطة تتبع (ترحيل)
Reluctance	معاوقة مغناطيسية
Remanence	مغناطيسية متبقية
Reset	اعادة ضبط (تنظيم)
Resetting value	قيمة اعادة الضبط
Residual	استبقائي
Restrain	كبح ، مسك
Restriking voltage	فولتية اعادة الاشعال
Ring	حلقــة
Ripple	تمــوج
Root mean square (r. m. s)	جذر متوسط التربيع (ج . م . ت)

Rotor	دوار
Row	سطر ، صف
Sag	تدلـي
Saliency	بروز ، نتوء
Salient pole	قطب بارز
Saturation	تشبع
Saturable reactor	ملف مفاعل قابل للتشبع
Scalar	لا متجه ، عددي
Search coil	ملف استكشاف
Secondary	ثانوي
Sectionalizing	تقسيم ، تقطيع
Self inductance	محاثة ذاتية
Semiconductor	شبه موصل
Semi – enclosed fuse	مصهر نصف مغلق
Sent – out (S. O)	مصدّر (مخرّج)
Seperate excitation	اثارة منفصلة
Sequence	تتابـع
Series trip	وسيلة افلات على التوالي
Servo – unit	وحدة (تحكم) مؤزرة
Set	طقم ، مجموعة
Setting	تنظيم ، معايرة
Shaded – pole	قطب مظلـل
Signal	اشارة
Shell -- type transformer	محول مغلف الملفات
Sinking fund	الموارد المالية الغاطسة
Short – circuit	دائرة قصيرة
Short circuit ratio	نسبة القصر في الدائرة
Shunt	تفرعي ، توازٍ
Shunt trip	وسيلة افلات على التوازي
Simultaneous	

Single	مفرد ، احادي
Single – phase	احادي الطور
Sinusoidal	جيبــي
Skin effect	التأثيرالقشري
Slip	انــزلاق
Slip ring	حلقة انزلاق
Slip speed	سرعة الانزلاق
Slow – break switch	اقليد بطــيء القطع
Smoothing circuit	دائرة تنعيم
Solid	مصمت ، صلد
Solid earthing	تأريض مباشر
Span	بون ، اتساع ، امتداد
Spacing	مباعدة
Spark	شرارة
Spark – over – voltage	فولتية قفز الشرر
Spining reserve	احتياطي دوار
Stability	استقرارية
Stabilizer	مثبت ، مقر
Stage	مرحلة ، شوط
Standerd	قياسي
Star – Connection	توصيل نجمي
Star point	نقطة التفرع النجمي
Starter	البادىء
State – variable	متغير الحالــة
Static balancer	موازن استاتيكي
Stator	الساكــن
Steady – State	الحالــة المستقرة (حالة – الاستقرار)
Steel	فولاذ
Step – down	خافــض
Step – up	رافــع

Strain	انفعال
Strand	ضفيرة ، جديلة
Stranded	مضفور ، مجدول
Stray losses	المفاقيد الشاردة
Stress	اجهاد ، جهد
Striking voltage	فولتية الاشعال
String	رابط سلسلي
Stroke	ضربة
Substation	محطة ثانوية
Subtransient	دون العابرة
Superoposition	تراكب
Supervisory control	اشراف سيطري
Surge	تَمَوُّر
Surge - absorber	ماص التمورات
Surge - divertor	مفرّع التمورات
Susceptance	تقبلية
Suspension insulator	عازل تعليق
Sustained	مداوم
Switch	اقليد (مفتاح)
Switching	اقلدة (فتح وغلق)
Switch - fuse	أقليد بمصهر
Switch - gear	معدات الاقلدة ، مؤقلدات
Symmetrical breaking capacity	سعة القطع المتماثلة
Symmetrical components	مركبات متماثلة
Synchronization	مزامنة (تزامن)
Synchronous	تزامني
Synchronous impedance	ممانعة تزامنية
Synthetic	تركيبي
System	منظومة ، نظام

Tap changer	مغير المأخذ
Tensile	قابلية الشد – توتر
Tension	توتر
Terminals	أطراف
Terminating impedance	ممانعة الأنهاء
Tertiary winding	ملف الثالثية
Thermocouple	مزدوج حراري
Three - phase	ثلاثي – الطور
Tie bar	قضيب رابط
Time constant	ثابت الزمن
Time delay	أعاقة (تأخير) زمنية
Tip	قمة ، رأس ، نهاية
Teroidal coil	ملف حلقي
Total break time	زمن القطع الكلي
Totally enclosed	محكم الغلق
Tower	برج
Tracking	تتبع
Transducer	محول الطاقة
Transductor	ملف مفاعلة محول (مضخم المغناطيس)
Transformation .	تحويل
Transformation ratio	نسبة التحويل
Transformer	محوّل
Transformer Bank	خازن محولات
Transformer tank	وعاء المحول (خزان)
Transient	عابر
Transient stability	أستقرارية عابرة
Transmission	نقل
Transmission line	خط نقل
Trarsposed	مبدّل الموضع . منقولة
Transposition	ابدال . تبديل موضع

Transverse	عرضي ، مستعرض
Travelling wave	موجة متنقلة (متحركة)
Trigger	قدح ، أشعال
Trip	أفلات ، عتق ، اسقاط
Tripping device	وسيلة أفلات
Trunk feeder	خط تغذية رئيسي
Tuned circuit	دائرة موالفة
Tunning	توليف ، تنغيم
Turbine	توربين
Turbulance	اضطراب
Turn ratio	نسبة اللفات
Twin cable	قابلو مزدوج
Two - port network	شبكة عاملة ثنائية المنفذة
Unbalance	غير متوازن (عدم توازن)
Under - excitation	اثارة منخفضة
Under - current	تيار منخفض
Under-ground	تحت الارض
Under - Voltage	فولتية منخفضة
Under - reach	ناقص الوصول
Unearthed	غير مؤرض
Unidirectinal	وحيد الأتجاه
Uniform	منتظم (متجانس)
Unit	وحدة . وحدية
Unit protection system	منظومة حماية وحدية
Unsymmetrical	غير متماثل
Utilzation	انتفاع . استفادة . أستخدام
Vaccum	فراغ
Valve	صمام
Var	قار

Vector	متجه
Ventilation	تهوية
Vibration	أهتزاز
Void	فجوة ، فراغ
Voltage	فولتية
Voltage divider	مقسم الفولتية
Vollage doubler	مضاعف الفولتية
Voltage gradiant	تدرج الفولتية
Voltage regulation	انتظام الفولتية
Voltage transformer	محول فولتية
Volt – ampere	فولت – أمبير
Watt	واط
Wave	موجة
Wave – form	شكل (صيغة) الموجة
Wave – front	مقدمة (جبهة) الموجة
Winding	ملف
Yoke	مقْرن
Zero error	خطأ صفري
Zero sequence	التتابع الصفري
Zigza	متعرج

المصطلحات العلمية (عربي – انكليزي)

Primary	ابتدائي
Amplitude	اتساع
Ignition	اتقاد
Directional	اتجاهي
Excitation	اثارة
Dielectric stress	اجهاد العازل
Single Phase	احادي الطور
Spinining reserve	احتياطي دائر
Dynamic reserve	احتياطي ديناميكي
Process	اجراء
Minimum	ادنى
Performance	اداء
Displacement	ازاحة
Clear	ازالة
Demodulation	ازالة التضمين
Base	اساس
Stator	الساكن
Remanence	استبقائية
Recovery	استرداد (استفاقة)
Consumbtion	استهلاك
Stability	استقرارية
Pilot wires	أسلاك مرشدة
Nominal	اسمي
Exponential	اسي
restriking	اعادة الاشعال
reclosing	اعادة الغلق
Trip	افلات (اسقاط)

افلات بيني	Intertrip
أقصى	Maximum
أقلدة (فصل وتوصيل)	Switching
اقليد (مفتاح)	Switch
أقطاب بينية	Interpoles
امبير – لفة	Ampere turn
امتصاص	Absorbtion
انتفاع ، استخدام	Utilisation
انتظام	Regulation
انحلال	Decomposition
انحياز	Bias
انزلاق القطب	Pole slipping
انفاذية	Permeability
انهيار	Breakdown
اهتزاز	Vibration
باديء	Starter
بدائي	Primitive
برج	Tower
بنية (تركيب)	Construction
بون (باع)	Span
بوابة	Gate
بورسلين (خزف)	Porcelain
بيانات(معلومات)	Data
تأثير قشري	Skin effect
تأخيـــر زمن عكسي	Inverse time lag
تأريض	Earthing
تبادلي	Mutual
تبديل	Commutation
تتابع سالب	Negative sequence

Positive sequence	تتابع موجب
Zero sequence	تتابع صفري
Underground	تحت الارض
Modificat ion	تحوير
Residual Magnatism	تخلف مغناطيسي
Damping	تخميد
Overlap	تداخل ، تراكب
Grading	تدرج
Sag	تدل
Oscillation	تذبذب
Overlapping	تراكب (تداخل)
Frequency	تردد
Notation	ترميز (رمز ، اصطلاح)
Leakage	تسرب
Impregnation	تشرب
Hunting	تشطط
Attenuation	تضاؤل ، توهين
Modula tion	تضمين
Cascade	تعاقبي
Q uadrature	تعامدي
Feedback	تغذية خلفية
Grid in feed	تغذية الشبكة الداخلة
Tap changing	تغيير المأخذ
Shunt	تفرعي (توازٍ)
Discharge	تفريغ
Coupling	تقارن
Blocking	تقييد
Forcasting	تكهن (تنبؤ)
Automatic	تلقائي (ذاتي)
Contact	تماس

تموّر	Surge
تواشج	Interlock
توربين	Torbine
توصيل	Connection
توفيق (موافقة)	Matching
تيار	Current
تيار الشحن	Charging Current
تيار القطع (الفصل)	Breaking current
تيار اندفاعي	Inrush current
تيار الوصل	Making current
تيار دوار	Circulating current
تيار دوامي	Eddy current
تيار مراق	Spill current
تيار مفرط (زائد)	Overcurrent
تيار مقنن	Rated current
تيار منخفض	Under current
تيارات شبيكية	Mesh currents
ثابت الزمن	Time constant
ثالثي	Tertiary
ثانوي	Secandary
ثايرستور	Thyristor
ثلاثي الطور	Three phase
ثنائي	Diode
ثنائي استقرار	Bistable
جبهة (مقدمة)	Front
جذب	Attraction
جلبة عازلة	Bushing
جهاز	Apparatus
جهاز تحويل (مغيّر)	Convertor
جمع	Summation

Transient state	حالة عابرة
Steady state	حالة مستقرة
Limit , Margin	حد
Critical	حرج
Bundle , Band	حزمة
Ferrule , ring	حلقة
Protective	حمائي
Protection	حماية
Carrier protection	حماية بالموجات الحاملة
Back upprtection	حماية ساندة
Differential protection	حماية فرقية
Impedance protection	حماية ممانعية
Unit protection	حماية وحّدية
Non - unit protection	حماية لاوحدية
Distance protection	حماية مسافية
Load	حمل
Base load	حمل أساس
Dead load	حمل خامل (غير مكهرب)
Dynamic load	حمل ديناميكي
Fluctuating load	حمل متقلب
Allowable load	حمل مسموح به
Over load	حمل مفرط
Clearance	حيز الخلوص
Outgoing	خارج
Off line	خارج – الخط
Bank	خازن
Characteristic	خاصية
Output	خرج
Line	خط
Trunk feeder	خط تغذية رئيسي

Radial line	خط شعاعي
Loss free line	خط عديم الفقد
Overhead line	خط نقل علوي
Error	خطأ
Through	خلالي (نافذ)
Imaginary	خيالي
Loop	دارة
Circuit	دائرة
Alarm circuit	دائرة تنبيه
Double circuit	دائرة ثنائية
Control circuit	دائرة سيطرة
Smoothing Circuit	دائرة تنعيم
Tuning Circuit	دائرة موالفة
Rotor	دوار
Cycle	دورة
Periodic	دوري
Automatic	ذاتي
Peak	ذروة
Binomial	ذو حدين
Double – winding	ذو ملفين
String connecter	رابط
Oscillograph	راسم الذبذبات
link	ربط (وصيل)
Armature reaction	رد فعل المنتج
Block diagram	رسم تخطيطي (كتلي)
Lamination	رقيقة
Angular	زاوي
Phase – angle	زاوية الطور
Time	زمن
Total Breaking time	زمن القطع الكلي
fault clearance time	زمن ازالة العطل

Load flow	سريان الحمل
Network	شبكة عاملة
Grid	شبكة كبرى
Mesh	شبيكة
Semiconductor	شبه موصل
Strength	شدة (متانة)
Flashover	شرر عرضي
Radial	شعاعي
Waveform	شكل (صيغة) الموجة
Pure	صافٍ (نقي)
Valve	صمام
Cable box	صندوق قابلو
Form	صيغة (هيئة)
Pumped - Storage	ضخ المخزون
Conditions	ظروف
Way - leave	طرق متروكة
phase	طور
Plastic clay	طين لدن
Transient	عابر
Insulator	عازل
factor	عامل
Power factor	عامل القدرة
Core - loss	عديم القلب
Fault	عطل
Earth fault	عطل ارضي
Through Fault	عطل خلالي (نافذ)
Symmetrical Fault	عطل متماثل
Node	عقدة
Nodal	عقدي
Element	عنصر

Asynchronous	غير متزامن (لامتزامن)
Asymmetrical	غير متماثل
Unbalanced	غير متوازن
Unearthed	غير مؤرض
Isolator	فاصل
Duration	فترة
Gap	فجوة
Branch , Limb	فرع
Vacuum	فراغ
Steel	فولاذ
Voltage	فولتية
Flux	فيض (جمعها فيوض)
Cable	قابلو
Interrupters	قاصمات
Circuit breaker	قاطع دورة
Base	قاعدة (اساس)
Triggering	قدح
Power	قدرة
Reactive power	قدرة متفاعلة
Interuption	قصم
Busbar	قضيب توزيع
Pole	قطب
Shaded – pole	قطب مظلل
Break , cut – off.	قطع
Core	قلب (لب)
Bridge	قنطرة
Arc	قوس (شرارة)
Cathode.	كاثود (مهبط)
Rrestrain	كبح
Efficiency	كفاءة

Operating quantity	كمية التشغيل
Non – directional	لا اتجاهي
Non - linear	لاخطي
Aperiodic	لادوري
Asynchronous	لامتزامن
Unbalanced	لامتوازن
Unsymmetrical	لامتماثل
Tap	مأخذ
Center tap	مأخذ وسطي
Surge absorber	ماص التموّرات
Commutater	مبدل (معدل)
Interconnected	مترابطة (ربط بيني)
Orthogonal	متعامد
Balanced	متزن (متوازن)
Zigzag	متعرج
Parallel , shunt	متوازٍ
Stranded	مجدول (مضفور)
Inductance	محاثة
Neutral	محايد
Enthalpy	محتوى حراري
Inductor	محث
Determinant	محدد
Substation	محطة ثانوية
Totally enclosed	محكم الغلق
Axis	محور
Qudrature - axis	محور تعامدي
Direct - axis	محور مباشر
Transformer	محول
Current - transformer	محول تيار
Auto - transformer	محول ذاتي
Transducer	محول طاقة

Voltage transformer	محول فولتية
Relay	مرحل
Bochhols relay	مرحل بوخلز
Reference	مرجع
Band pass filter	مرشح امرار نطاقي
Complex	مركب
Component	مركبة
Symmetrical - component	مركبة متماثلة
Admittance	مسايرة ، مسامحة
Synchronisation	مزامنة
Phasor	مطاور
Anode	مصعد (أنود)
Solid	مصمت
Fuse	مصهر
Amplifier	مضخم
Reluctance	معاوقة
Equipment	معدات
Booster	معزز
Parameter	مَعْلَم
Feeder	مغذ
Changer	مغير
Tap changer	مغير مأخذ
Galvanized	مغلفن
Reactance	مفاعلة
Capacitive reactance	مفاعلة سعية (سعوية)
Losses	مفاقيد
Surge diverter	مفرع التمورات
Over excited	مفرط (متجاوز) الاثارة
Phase comparator	مقارن طور
Omic	مقاومي

Stabilizer	مقر
Yoke	مقرن
Chopper	مقطّع (مقدد)
Rectifier	مقوم
Inverter	مقوم عكسـي (عاكس)
Alive	مكهرب
Contacts	ملامسات (نقاط توصيل)
Annealed	ملدّن
Winding	ملف
Bar winding	ملف قضيبـي
Holding coil	ملف ضبط (اقرار)
Reactor	ملف مفاعل
Dampcr winding	ملفات تخميد
Impedance	ممانعة
Characteristic Impedance	ممانعة مميزة
Permeance	منافذة
Armature	منتج (عضو انتاج)
Catenary	منحنـى سلسلي
in - phase	منطبق الطور
Automatic voltage regulator.	منظّم الفولتية الذاتـي
Discrete	منفصل
System	منظومة
Alternator	منوّب
Balancer	موازن
Conductamce	مواصلة
Chorded	موتّر
Wave	موجة
Carrier wave	موجة حاملة
Travelling wave	موجة منتقلة
Earthed	مؤرض

Switchgears	مؤقلدات (معدات قطع ووصل)
Conductor	موصل (ناقل)
Through	نافذ (خلالي)
Pulse	نبظة
Short circuit ratio	نسبة القصر في الدائرة
Turn ratio	نسبة اللفات
Margin	نطاق
Junction	نقطة اتصال (ملتقى)
Star point	نقطة التفرع النجمي
Transmission	نقل
Scnding end	نهاية الأرسال
Recieving end	نهاية الأستلام
Drooping	هابطة
Corona	هالة
Configuration	هيئة (شكل عام)
Incoming	وارد (قادم . داخل)
Watt	واط
Unit	وحدة . وحدَية
Drives	وسائل تدوير (مسيِّرات)
Device	وسيلة
Tripping device	وسيلة افلات (أسقاط)
Link	وصيل (جمعه وصيلات)
D. C. Link	وصيل (تيار مستمر)
Radio link	وصيل راديوي
Cross - channal link	وصيل عابر البحار
Dash - pot	وعاء توهين

الرموز ، والمختصرات المهمـة

Ampere (A)	أمبيـــر
Steel - Cored Aluminium (SCA)	ألمنيوم لب فولاذي (أ . ل .ف)
Ohm (Ω)	اوم (Ω)
Inverse definite minimum time lag (I. D. M. T. L)	تأخير الزمن العكسي الادنى المحدد
Root mean square (r. m. s.)	جذر متوسط التربيع (ج . م . ت)
Centegrade (C°)	درجة مئوية (م)
Centimetre (Cm)	سنتمتر (سم)
Farad (F)	فاراد (F)
Potential difference (p. d)	فرق الجهد (ف . ج)
Electromotive force (e. m. f)	قوة دافعة كهربائية (ق . د . ك)
Magnetomotive force (m. m. f)	قوة دافعة مغناطيسية (ق . د . مغ)
Kilovolt (KV)	كيلو فولت (ك . ف)
Kilovolt ampere (KVA)	كيلو فولت أمبير (ك . ف . أ)
Microfarad (MF)	مايكروفاراد
Geometric mean distance (GMD)	متوسط البعد الهندسي (م . ب . ه)
Metre (m)	متر (م)
Geometric mean radius (GMR)	متوسط نصف القطر الهندسي (م . نق . ه)
Current trans former (C. T)	محول تيـار (C. T)
Summation transformer (S. T)	محول جمـع
Voltage transformer (V. T)	محول فولتية (V. T)
Equivalent Copper Aera (E . C . A)	مساحة النحاس المكافئة (م . ن. مك)
Time multiplier (T. M)	مضاعف الزمن

Mho (℧)	مهو
Megavar (MVAr)	ميكا فولت أمبير متفاعل
Megawatt (MW)	ميكا واط
Megavolt ampere (MVA)	ميكا فولت أمبير (م. ف. أ)
Millimetre (mm)	مليمتر (ملم)
Millihenry (mH)	ميلي هنري
Per - unit system	نظام نسبة الوحدة
Henry (H)	هنري
Watt (W)	واط

رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد ١٤٤ لسنة ١٩٨٧

مطبعة دار الكتب للطباعة والنشر
جامعة الموصل

Electrical Power systems

Volume 2

Translated By:

Dr.Prof.Mohammed T.Lazim

Dr.Prof.Faiq J.Mohammed

University of Mousel Press-Iraq

1987